

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**  
**ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**БЕРНИК ІРИНА МИКОЛАЇВНА**



УДК 66.084.8:66.063.6

**НАУКОВІ ОСНОВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ І**  
**ОБЛАДНАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ОБРОБКИ**  
**ДИСПЕРСНИХ СЕРЕДОВИЩ**

05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України

**Науковий  
консультант:**

доктор технічних наук, професор  
**ЛУГОВСЬКИЙ Олександр Федорович,**  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені  
Ігоря Сікорського», завідувач кафедри прикладної  
гідроаеромеханіки і механотроніки

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**ВІТЕНЬКО Тетяна Миколаївна,**  
Тернопільський національний технічний університет  
імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки  
України, завідувач кафедри обладнання харчових  
технологій

доктор технічних наук, професор  
**ЗАВ'ЯЛОВ Володимир Леонідович,**  
Національний університет харчових технологій  
Міністерства освіти і науки України, професор  
кафедри процесів і апаратів харчових виробництв

доктор технічних наук, професор  
**ЛЯПОЩЕНКО Олександр Олександрович,**  
Сумський державний університет Міністерства  
освіти і науки України, професор кафедри хімічної  
інженерії

Захист дисертації відбудеться «27» квітня 2021 р. о 14<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.05 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37, корп. 19, ауд. 201/1.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 р.

В.о. вченого секретаря  
спеціалізованої вченої ради Д 26.002.05  
д.т.н., професор



Т. О. Шаблій

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Ультразвукові кавітаційні технології унікальні та ефективні, використовуються для реалізації технологічних процесів хімічної промисловості та переробних виробництв.

Широке впровадження ультразвукової техніки та технології стримується низкою нерозв'язаних проблем. Дотепер немає загальноприйнятої розрахункової моделі процесу проходження стадій обробки. Технологічне середовище, як правило, представлено деякою приєднаною масою до поверхні випромінювання кавітаційного апарату. Зміна властивостей та параметрів технологічного середовища під час його обробки є доведеним фактом. Отже, такий підхід, якщо і можна використати, то лише в рамках тих режимів та параметрів, у яких були проведені дослідження. У виконаних раніше роботах не враховано взаємодію акустичного апарату та середовища, що не відображає повної картини процесу кавітаційної обробки, а також встановлення розрахункової моделі для аргументованого визначення раціональних параметрів. Більшість запропонованих моделей відображають лінійні коливання бульбашки зі сферичною поверхнею без урахування в'язкості. Зазвичай, резонансна частота визначається завдяки застосуванню дискретної моделі для окремої бульбашки з подальшим штучним перенесенням на кавітаційний об'єм.

Одним із шляхів розв'язання проблеми є створення моделі та дослідження її на основі представлення акустичного апарату і технологічного середовища єдиною структурованою системою, з урахуванням їхньої взаємодії та взаємовпливу у часі і просторі. При цьому, така модель має відображати у рівняннях руху пружні, інерційні та дисипативні параметри, за врахування законів їх зміни як в акустичному апараті, так і в технологічному середовищі.

Таким чином, узгодження характеристик системи «апарат – середовище», вдосконалення та розробка технології і обладнання ультразвукової обробки технологічних середовищ є актуальним напрямом досліджень.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано на кафедрі прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» відповідно до тематики держбюджетних науково-дослідних робіт: «Розробка гідравлічних мехатронних систем машинобудування з високими показниками ефективності і надійності» (2015 – 2016 р.р., № ДР 0115U000397, автор – виконавець теми); «Створення високоефективних виконавчих пристроїв до адаптивних систем автоматизації з відкритою архітектурою» (2017 – 2018 р.р., № ДР 0117U004337, автор – виконавець теми).

**Мета і завдання дослідження.** Мета роботи полягає у розробці наукових основ вдосконалення процесів ультразвукової обробки шляхом синтезу параметрів взаємодії обладнання і дисперсного середовища, забезпечення раціональних режимів та параметрів за мінімальної енергоємності.

Для досягнення означеної мети в роботі сформульовані такі задачі:

– здійснити аналіз технологій та обладнання акустичної обробки рідинних дисперсних середовищ хімічної технології та переробних виробництв;

- розробити методологію та методи дослідження реологічних властивостей рідинних дисперсних середовищ та ступеня їх впливу на спільний рух системи «кавітаційний апарат – середовище»;

- виконати аналітичні дослідження впливу реологічних властивостей технологічних середовищ на утворення і розвиток кавітаційної області;

- дослідити енергетику стадій кавітаційного процесу акустичної обробки технологічних середовищ;

- здійснити аналітичні та експериментальні дослідження руху системи «кавітаційний апарат – середовище» на основі застосування дискретних і континуальних моделей та поетапного врахування стадій утворення, розвитку і сплескування бульбашок кавітаційної області;

- розробити алгоритми та методики визначення раціональних режимів і параметрів кавітаційної обробки рідинних дисперсних технологічних середовищ;

- провести оцінку ефективності результатів досліджень та їх практичного використання.

*Об'єкт дослідження* – робочі процеси ультразвукової кавітаційної обробки рідинних дисперсних технологічних середовищ.

*Предмет дослідження* – режими та параметри ультразвукової кавітаційної обробки рідинних дисперсних середовищ.

**Методи дослідження.** Розробка методології і методів математичного та експериментального дослідження реологічних властивостей дисперсних середовищ обґрунтована застосуванням загальноприйнятих досягнень фізико-хімічної механіки, аналізу і синтезу, системного підходу. Методи аналітичного дослідження руху системи «кавітаційний апарат – середовище» базуються на використанні класичних положень теорії механічних коливань і суцільних середовищ. Алгоритми та методики визначення режимів і параметрів розроблені на основі методів аналітичного та експериментального встановлення ефективного проходження досліджуваних процесів. Врахування стадій обробки різних технологічних середовищ є умовою створення синергетичних систем «ультразвукова установка – технологічне середовище». Базою отриманих практичних результатів було використання вдосконалених та розроблених нових критеріїв, синтезуючих параметри дискретних і розподілених моделей за законами частотнозалежного та частотнонезалежного розсіяння енергії.

Наукова ідея роботи полягає у вдосконаленні технологій та ультразвукового обладнання шляхом визначення і спільного використання внутрішніх властивостей оброблювальних середовищ і робочого обладнання, як єдиної акустичної системи. Гармонізація активних і реактивних сил такої акустичної системи є необхідною процедурою отримання максимальної енергії ефективного кавітаційного процесу.

**Наукова новизна.** У роботі вирішена важлива наукова проблема розкриття фізичної сутності процесів взаємодії ультразвукового обладнання та оброблювальних дисперсних середовищ і встановлення на цій основі законів руху досліджуваних систем.

*Уперше:*

- розроблено математичну розрахункову модель технологічного середовища, відмінного за своїм складом і методом обробки, з урахуванням стадій перебігу кавітаційного процесу;

- встановлено закономірності руху дискретно-континуальних систем у режимі розвиненої кавітаційної обробки технологічних середовищ з метою забезпечення високої продуктивності та мінімізації енерговитрат;

- отримано аналітичні залежності для визначення тиску в системі «поверхня випромінювання акустичного апарата – середовище» та максимального об'єму області розвиненої кавітації;

- отримано аналітичні залежності визначення необхідного рівня енергії обробки технологічних середовищ за врахування зміни їх реологічних властивостей;

*вдосконалено:*

- параметри та режими акустичного випромінювача із врахуванням зміни реологічних властивостей середовища на основі структурних та феноменологічних моделей досліджуваних систем;

*набули подальшого розвитку:*

- методи дослідження ультразвукових кавітаційних технологій.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблені алгоритми та методики розрахунків параметрів і режимів ефективної обробки різних за складом та реологічними властивостями технологічних середовищ. Отримано підвищення ефективності проходження процесів хімічних технологій шляхом застосування встановлених раціональних режимів, параметрів, що забезпечують формування кавітаційної області максимального об'єму в гетерогенних середовищах із різними реологічними властивостями. Врахування умов розповсюдження хвиль на основі континуальної моделі рідинного середовища із реалізацією визначених параметрів забезпечує збільшення об'єму зони розвинутої кавітації на 35–45 %. Реалізація резонансного режиму за отриманими формулами уможливила збільшення амплітуди коливань у 7–8 разів, зменшення витрати енергії на 50–70 %, стійкий робочий режим акустичного апарату.

Створено передумови для розробки кавітаційних апаратів із змінними параметрами робочого процесу за програмою забезпечення максимального ефекту акустичної обробки технологічного середовища.

Результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі під час виконання практичних та лабораторних робіт на кафедрі прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Промислове впровадження наукової розробки на ТОВ «Агрохім Групп» у технологічному процесі виробництва гумінових добрив. Науково-технічна розробка «Ультразвуковий кавітаційний знезаражувач – гомогенізатор – дегазатор» на підприємстві ООО «Компанія «Джала Голд» у технологічному процесі виробництва рідких азотних та комплексних добрив. Ультразвуковий кавітаційний фільтр з ефектом самоочищення впроваджено у виробництво «ТОВ Ашер 8». Впровадження наукових розробок на ПАТ «Дрогобицький завод автомобільних кранів» (м. Дрогобич Львівської області), ТОВ «Люстдорф» (м. Іллінці Вінницької області) та ПП «Кондитерський дім «Санкруа» (м. Вінниця).

Запропоновано методики дослідження взаємовпливу параметрів акустичного випромінювача енергії і властивостей рідинних дисперсних середовищ хімічної промисловості на основі структурних та феноменологічних моделей досліджуваних систем можуть бути використані і в інших галузях.

**Особистий внесок здобувача.** Здобувачем особисто здійснено наукове обґрунтування для системного комплексного дослідження взаємодії акустичного апарата та оброблювального дисперсного середовища, що дало змогу встановити закономірності руху дискретно-континуальних систем для забезпечення високої продуктивності з мінімізацією енерговитрат, розв'язувати проблеми встановлення раціональних технологічних режимів та створення передумов керування роботою акустичних перетворювачів. У наступних роботах викладені основні результати дисертаційної роботи, які отримані та опубліковані автором самостійно [10, 12, 13, 15, 16, 18, 20, 21, 23, 24, 30, 32, 33, 39, 51, 53–58].

Особистий внесок здобувача у спільних друкованих працях: розроблення технології та визначення ефективності знезараження за використання ультразвукової кавітації [1, 25]; розроблення фізичної моделі та кавітаційного обладнання для рідинно-дисперсних середовищ [2–4]; моделювання кавітаційних процесів обробки дисперсних середовищ [5–9, 48, 49]; оцінка технологічного процесу ультразвукового очищення поверхонь [11]; дослідження параметрів та встановлення залежності впливу середовища на робочий процес ультразвукової кавітаційної обробки [14, 17]; аналіз методів визначення швидкості розповсюдження хвиль у середовищі [19]; дослідження аналітичних залежностей для визначення взаємодії акустичного апарата із середовищем [27]; вибір конструктивних параметрів моделі для дослідження вібраційних та акустичних систем [28, 34]; розроблення математичної моделі [26, 31]; розрахунок акустичної системи ультразвукового апарата для інактивації мікроорганізмів у рідкому середовищі [35]; дослідження використання ультразвукових технологій та обладнання для інтенсифікації технологічних процесів [41–50, 52]; у патентах на корисні моделі авторів належить розробка загальних ідей й участь у формулюванні технічних рішень [38, 40].

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи висвітлені та обговорені на: Міжнародних науково-технічних конференціях «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» (Черкаси, 2012; Київ, 2015, 2016, 2018, 2019, 2020); XIII Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка та технологія» (Севастополь, 2012); Міжнародних науково-технічних конференціях «Енергоощадні машини і технології» (Київ, 2013, 2015); Першій науково-практичній конференції біомедичних інженерів і технологів України «Сучасний стан та перспективи біомедичної інженерії і медичної промисловості України» (Київ, 2015); XVII Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (Одеса, 2016); Міжнародних науково-технічних конференціях «Вібрації в техніці та технологіях» (Вінниця, 2017; Львів, 2018; Київ, 2019); IX International Conference «Heavy Machinery-HM 2017» (Zlatibor, 2017); XVIII Міжнародній науково-технічній конференції «Промислова гідравліка і пневматика» (Вінниця, 2017); Міжнародній науково-технічній конференції «Енергоефективність в галузях економіки України» (Вінниця, 2017); Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційний розвиток харчової індустрії» (Київ, 2017); I Міжнародній

науково-технічній конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту» (Вінниця, 2019).

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 58 наукових праць, у тому числі 1 монографія, 36 статей у наукових фахових виданнях (з них 3 статті у виданнях іноземних держав та 2 статті у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science), 3 патенти на корисну модель, 18 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел (364 найменування) та 4 додатків (на 39 сторінках). Загальний обсяг роботи становить 433 сторінки, у тому числі 330 сторінок основного тексту, 121 рисунок та 25 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми та основні напрями дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи досліджень, представлено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, висвітлено особистий внесок здобувача та апробацію результатів досліджень.

У **першому розділі** проаналізовано область застосування та фізичні аспекти кавітаційної технології обробки рідинних середовищ. Зокрема зазначено, що у дослідженнях з теорії коливаль, фізики і техніки ультразвуку, виконаних Агранатом Б. А., Зав'яловим В. Л., Розенбергом Л. Д., Ісаковичем М. О., Лепендіном Л. Ф., Назаренком І. І., Шутіловим В. А. та ін., розкриті основні закономірності розповсюдження акустичних хвиль у матеріалах та середовищах. На основі результатів цих праць було запропоновано самостійний науково-практичний напрям – кавітаційні технології обробки середовищ та матеріалів. Завдяки роботам Афтаназієва І. С., Вітенько Т. М., Долінського А. А., Іваницького Г. К., Луговського О. Ф., Литвиненка О. А., Ляпоценка О. О., Некоза О. І., Немировича П. М., Промтова М. А., Сиротюка М. Г., Хмельова В. Н., Яхно О. М., Федоткіна І. М. доведено доцільність використання гідродинамічної та ультразвукової кавітації в технологічних процесах, а їхні результати значно розширили наші уявлення у царині досліджень режимів, параметрів і конструкцій обладнання.

Здійснено огляд літературних джерел та виконано аналіз сучасних реологічних моделей дисперсних систем, оцінку наявних аналітичних залежностей для визначення режимів і параметрів кавітаційного процесу та конструкцій акустичних апаратів. Реалізуються кавітаційні технології для низки різних технологічних процесів хімічної промисловості та переробних виробництв, зокрема, диспергування, емульгування, гомогенізація, дегазація, стерилізація, екстрагування, кристалізація, насичення та інших.

Існує неоднозначність тлумачень та визнання різних стадій акустичної кавітаційної обробки. Недостатньо уваги приділено законам зміни реологічних властивостей технологічних середовищ під час їхньої обробки та необхідності оцінки і врахування цих змін у практичних розрахунках. У повному обсязі не досліджено процеси взаємодії кавітаційного апарата і технологічного середовища в частині визначення раціональних параметрів та режимів. Такі дослідження потребують

узгодження сил акустичного апарата з опором середовища як реакцію на силову дію апарата. Визначення впливу опору середовища на дію кавітаційного апарата має ґрунтуватися на врахуванні його масових, пружних та в'язких характеристик на основі використання континуальних моделей.

У роботі висвітлено наукову ідею щодо розгляду контактної зони взаємодії системи «кавітаційний апарат – технологічне середовище» на основі визначення рівноваги силового тиску апарата і напружень, що виникають в оточенні бульбашки з розглядом моделі рідини, як системи з розподіленими параметрами. Такий підхід дає змогу розкрити фізичну сутність взаємодії, розробити пропозиції щодо вдосконалення технології та параметрів обробки технологічних середовищ. Таким чином, виконаний огляд літературних джерел і зазначені вище наукові та практичні результати стали передумовою обґрунтування мети, формулювання задач, розробки методології та методів дисертаційного дослідження.

У **другому розділі** приведено результати розробки методології та обґрунтування методів дослідження процесів і параметрів акустичної обробки технологічних середовищ на основі системного підходу та з'ясування фізичної сутності їх механізмів (рис. 1).

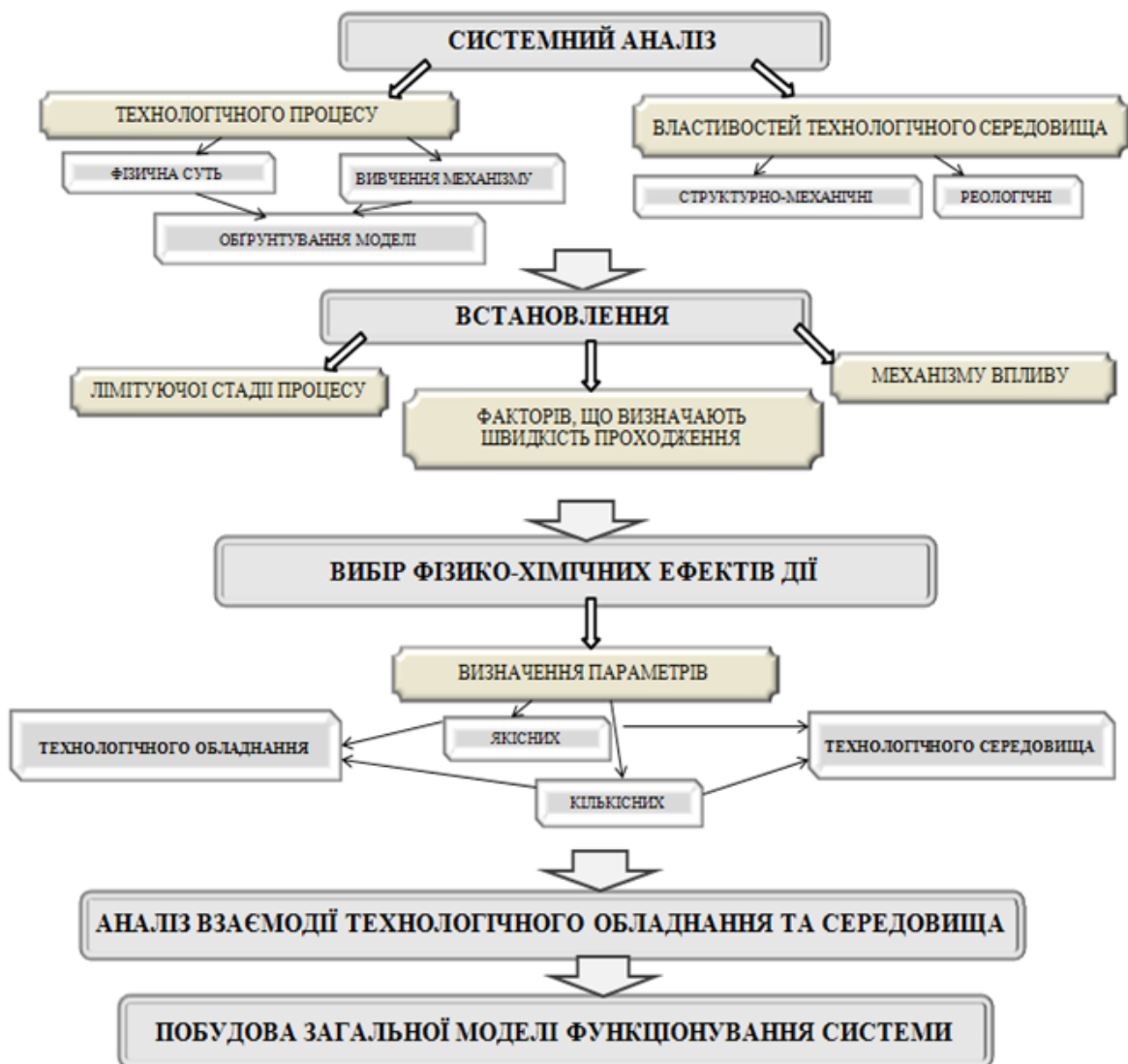


Рисунок 1 – Структурна схема методики проведення досліджень



Необхідність розробки методик дослідження зумовлено встановленням раціональних режимів та параметрів акустичних апаратів.

На початковому етапі доцільно дослідити структурно-механічні та реологічні властивості технологічного середовища, які становлять структурну модель. Наступні три етапи алгоритму визначають розподіл зон і областей розвиненої кавітації з урахуванням зміни фізичних властивостей оброблюваного дисперсного середовища. Такий підхід було використано у виборі математичної моделі для досліджуваних середовищ. Розроблена методологія досліджень базувалася на врахуванні параметрів процесу акустичної обробки дисперсного середовища (рис. 2).

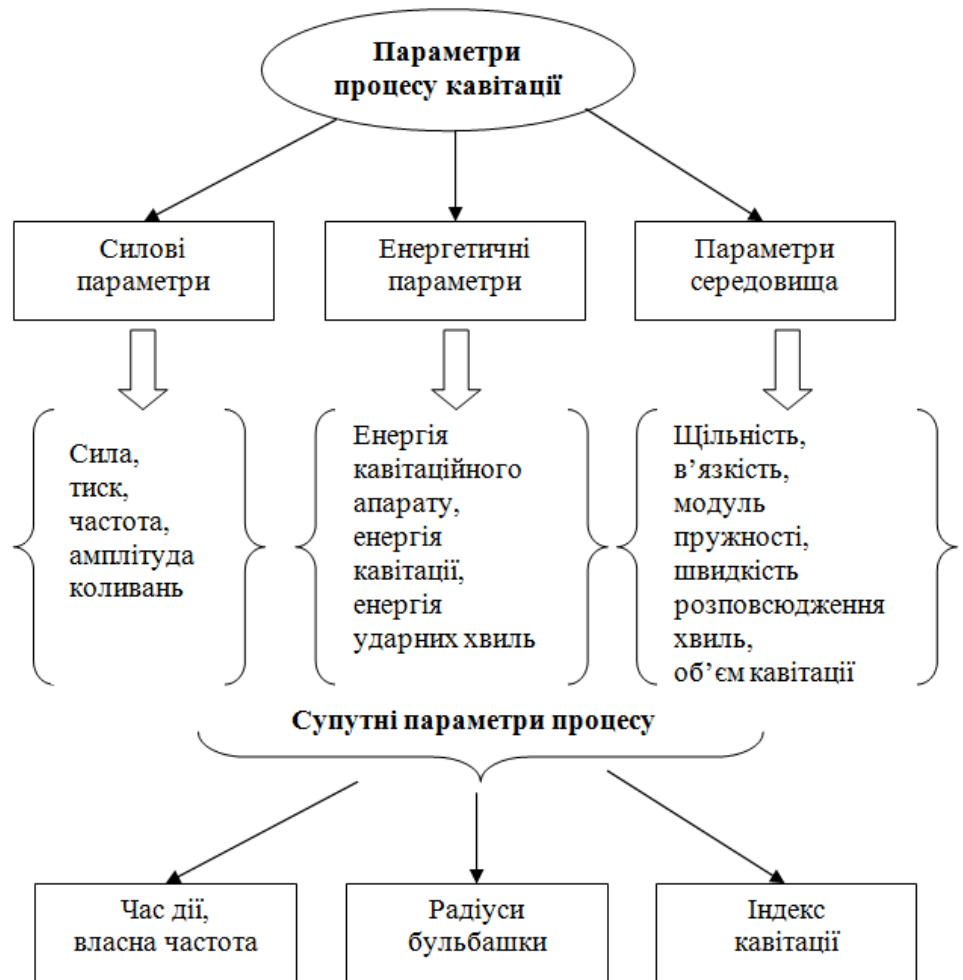
Для визначення методів вимірювання та контролю робочого процесу параметри акустичної кавітаційної обробки були розділені на три групи: силові, енергетичні та середовища. Результати досліджень за такою методологією дали можливість визначити рівні складності кавітаційного процесу розподілу зон і областей розвиненої кавітації за урахування зміни фізичних властивостей оброблювальних рідинних середовищ, якими є щільність, хвильовий опір, коефіцієнт поглинання.

Механізм та фізична сутність наявних методів обробки технологічних середовищ,

особливостей реалізації стадій кавітаційного процесу засвідчують таке.

1. Фізичні явища при кавітації прямо пропорційні інтенсивності сплескування бульбашок.

2. Фізико-хімічні та механічні властивості вихідних компонентів технологічного середовища відіграють визначальну роль реалізації акустичної обробки.



**Рисунок 2 – Параметри акустичної кавітаційної обробки дисперсних середовищ**

3. Процес визначається режимами ультразвукового впливу (частота і амплітуда звукового тиску) і фізичними властивостями оброблюваного середовища (густина, поверхневий натяг, пружність та в'язкість).

Інтегральними параметрами функції визначені енергія, інтенсивність, потужність. Врахування множинного перетворення енергії ультразвукових коливань здійснено на основі системного підходу за встановлення оптимальних режимів обробки. Для визначення інтенсивності використовували параметри кавітаційного процесу, як густина середовища, амплітуда і частота коливань, швидкість розповсюдження хвиль. Дані параметри дозволили отримати числові значення тиску, амплітуди, швидкості та прискорення коливань контактної зони, які використано для розробки алгоритмів.

Однією із задач вибору методик досліджень було визначення опору середовища на основі гіпотези, що ефективність формування кавітаційної енергії визначається структурою та взаємодією основних елементів ультразвукової технологічної системи.

Ефективність передачі коливань поверхні випромінювання акустичного апарата до технологічного середовища залежить від ряду умов, які забезпечують максимально можливий відбір енергії від джерела коливань; мінімальне розсіювання енергії в елементах конструкції технологічного апарата; найбільше використання введеної в оброблюване середовище акустичної енергії для забезпечення перебігу даного технологічного процесу; максимальну стійкість параметрів акустичного апарата у заздалегідь заданих технологією їхніх значень та режимів роботи акустичного апарата.

Під час визначення параметрів, які формують модель процесу кавітації, виникає задача вимірювання швидкості розповсюдження акустичних хвиль (амплітуди, частоти, фази). На основі огляду та аналізу розглянутих методів вимірювання швидкості розповсюдження акустичних хвиль був вибраний фазовий метод для режиму біжучої хвилі (рис. 3).

Для дослідження взаємодії технологічних середовищ і їхнього впливу на акустичний апарат застосовано аналітично-експериментальний метод, що ґрунтується на використанні аналітичних залежностей, та із виконаних експериментів знаходили швидкість розповсюдження хвиль.

**У третьому розділі** здійснено аналітичні та експериментальні дослідження ступеня впливу пружно-інерційних, в'язко-пластичних та пружних властивостей технологічного середовища на параметри кавітаційного процесу.

Сучасне уявлення про перебіг технологічного процесу під дією кавітації, як способу обробки технологічного середовища, характеризується суттєвою змінною реологічних властивостей, якими є в'язкість, пластичність і пружність. Знання зміни цих властивостей уможливило не тільки більш точний опис процесу, а і визначення умови взаємодії середовища і кавітаційного апарата з метою вдосконалення параметрів та характеристик джерела енергії. Дослідженням в'язко-пластичних властивостей технологічного середовища передувало здійснення оцінки законів зміни коефіцієнта динамічної в'язкості.

У визначенні в'язко-пластичних властивостей технологічного середовища в процесі їх обробки застосовувалася гіпотеза в'язкого тертя, що має назву частото-залежна модель.

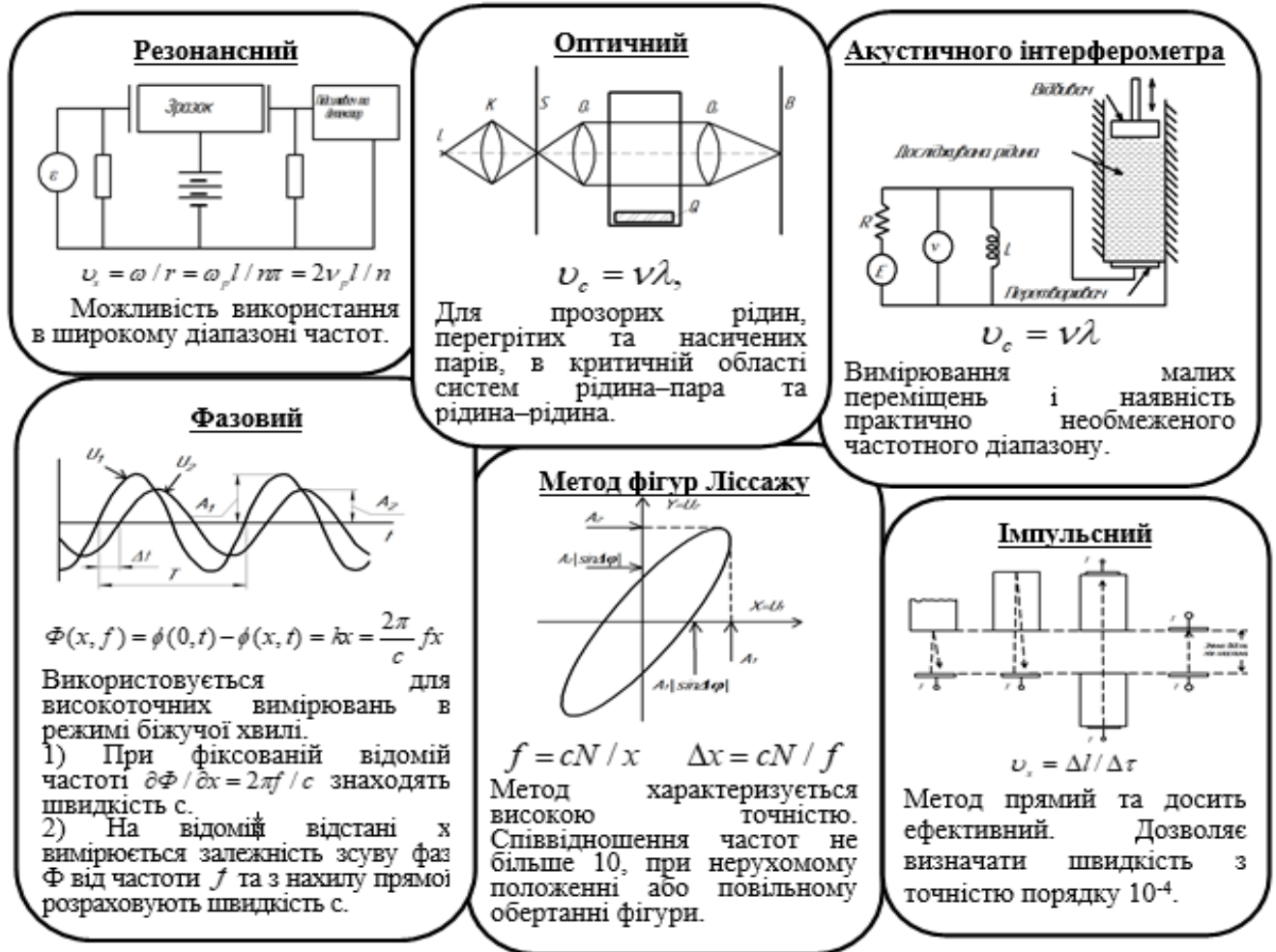


Рисунок 3 – Методи вимірювання швидкості розповсюдження хвиль у технологічному середовищі

У роботі вирішено хвильове рівняння пружно-в'язкого середовища та отримано формулу для визначення коефіцієнта опору, за допомогою якого і встановлюється в'язкість технологічного середовища:

$$\eta = 2E \frac{\alpha}{c(k^2 - \alpha^2)}. \quad (1)$$

На величину коефіцієнта опору  $\eta$  має вплив коефіцієнт поглинання хвилі  $\alpha$  у середовищі, хвильове число  $k$  та модуль пружності середовища  $E$ .

Відповідно до гіпотези залежності в'язкості від амплітуди коливань отримано формулу для визначення коефіцієнта поглинання  $\alpha$ , який і встановлює в'язкість технологічного середовища:

$$\alpha = \sqrt{\frac{(\phi + 1) \rho \omega^2}{2\phi^2 E'}}, \quad (2)$$

де  $\phi = E''/E'$  – відношення уявної частини  $E''$  до дійсної  $E'$  частини комплексного модуля пружності;  $\rho$  – щільність середовища.

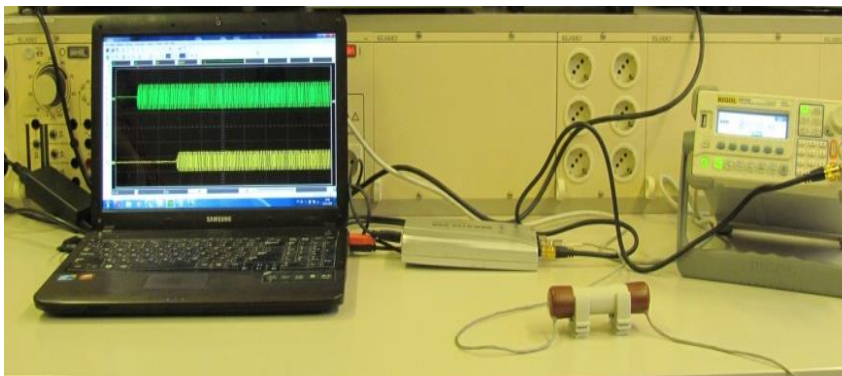
Для визначення числових значень коефіцієнта опору та коефіцієнта поглинання необхідно мати значення швидкості  $c$  розповсюдження хвиль, числове значення щільності середовища в конкретний момент проходження тієї чи іншої стадії кавітаційної обробки середовища та модуль пружності. Для експериментального дослідження було застосовано акустичний метод за допомогою гідрофонів (рис. 4). Під час роботи в режимі приймання на обкладинках п'єзоелемента гідрофона з'являється різниця потенціалів, величина якої пропорційна звуковому тиску. Метод дає змогу досліджувати як форму звукового поля, так і давати оцінку інтенсивності кавітаційних процесів.

У результаті експериментів та їх обробки були визначені коефіцієнти згасання коливань технологічних середовищ із різними реологічними властивостями.

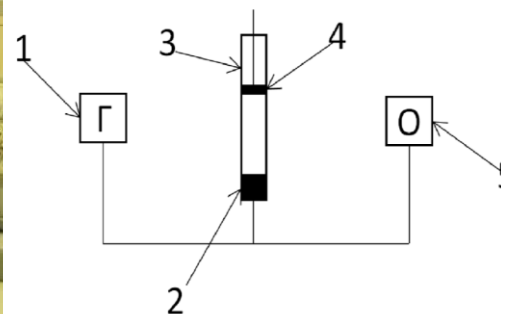
Як було зазначено у другому розділі, одним із найважливіших параметрів, від якого залежить вплив пружно-інерційних характеристик технологічного середовища на проходження кавітаційного процесу, є швидкість розповсюдження хвиль  $c$ :

$$c = \sqrt{E/\rho}. \quad (3)$$

Методикою вибрано фазовий метод визначення швидкості розповсюдження хвиль  $c$  (рис. 5).



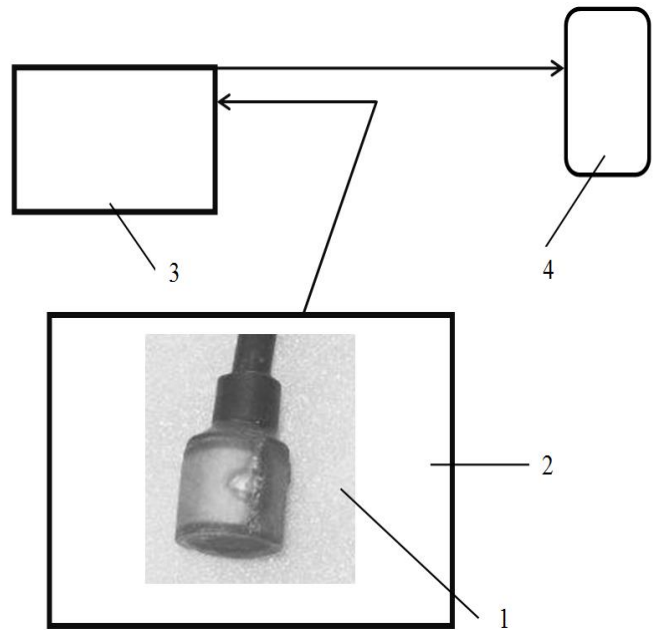
а



б

**Рисунок 5 – Експериментальна установка для вимірювання швидкості розповсюдження хвиль у технологічному середовищі:**

**а – загальний вигляд; б – схема; 1 – генератор імпульсів; 2 – випромінювач; 3 – трубка із технологічним середовищем; 4 – відбивач; 5 – комп'ютер**



**Рисунок 4 – Схема вимірювання параметрів кавітаційного процесу гідрофоном:**

**1 – гідрофон; 2 – ванна з технологічним середовищем; 3 – апаратура для реєстрації сигналу; 4 – апаратура для запису сигналу**

Як приклад, приведено віброграми (рис. 6) розповсюдження хвиль у воді. Подібні віброграми отримано і для інших рідинних середовищ різної в'язкості. Для аналітичного дослідження умови узгодження апарата і технологічного середовища з метою отримання умови максимальної передачі енергії до оброблювального середовища розглянуто процес розповсюдження акустичної хвилі від апарата до оброблювального середовища (рис. 7).



а

б

**Рисунок 6 – Характерні віброграми для вимірів акустичних параметрів у воді:  
а – частота  $f = 2,58$  кГц, б –  $f = 52$  кГц**

Плоска акустична хвиля по осі  $X$  від апарата до границі із середовищем розповсюджується з акустичним опором  $Z_a$ , а у середовищі на границі з апаратом по цій самій осі  $X$ , унаслідок дії цього опору виникає хвильовий опір  $Z_c$ . Цілком очевидно, що окрім хвилі, яка передається в середовище, виникає на межі контакту апарата із середовищем хвиля, яка рухається у зворотному напрямку.

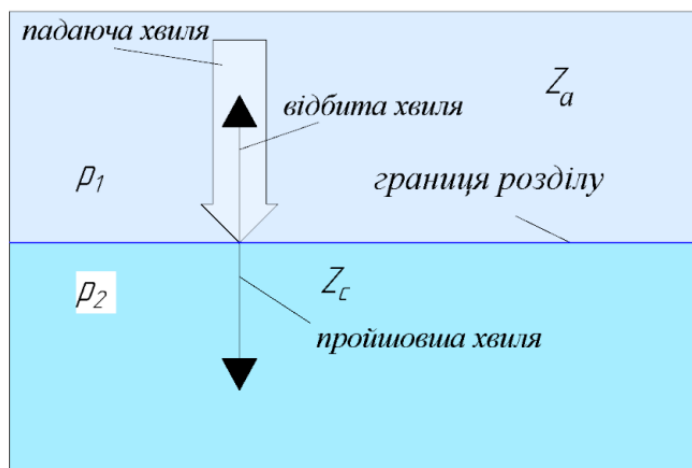
Таким чином, утворюється складне хвильове поле, яке представлено в роботі коефіцієнтами проходження та відбиття хвилі.

Умову визначення хвильового опору для його максимального проходження реалізовано шляхом введення між границею апарата і середовища компенсатора, який виконує роль опору навантаження і відбиття акустичних хвиль виключно в зоні апарата (рис. 8).

За умови, що між апаратом і середовищем встановлено компенсатор довжиною  $l = \lambda/4$ , де  $\lambda$  – довжина хвилі в компенсаторі, отримано вираз для визначення вхідного хвильового опору:

$$Z_{вх}(\lambda/4) = Z_a^2 / Z_c \quad (4)$$

Отже, вибираючи значення вхідного опору компенсатора довжиною  $\lambda/4$ , отримано умову максимальної передачі, за якою хвильовий опір апарата і компенсатора узгоджені.



**Рисунок 7 – Розповсюдження акустичної хвилі від апарата до оброблювального середовища**

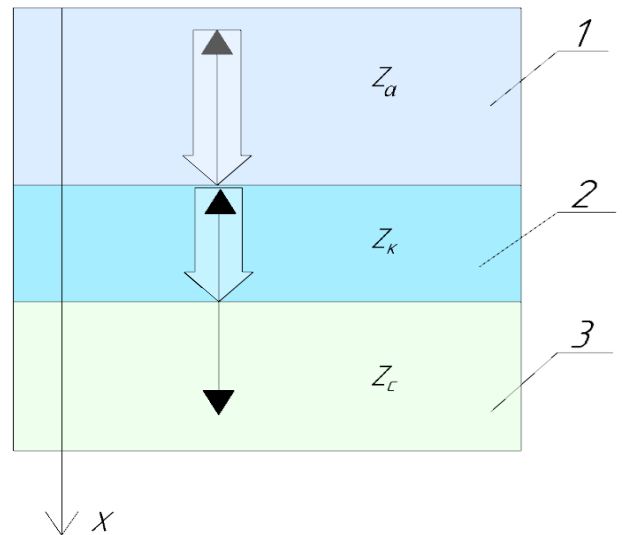


Розташування між границею апарата і середовища допоміжного шару матеріалу з таким акустичним опором забезпечує рівність акустичного опору апарата й еквівалентної лінії передачі. Тоді відбиття від обох границь додатково встановленого шару хвилі будуть рівні за амплітудою і рухатимуться у протифазному напрямку, що і призведе до їхньої взаємної компенсації. Зсув між фазами руху на  $180^\circ$  забезпечується різницею ходу хвиль між границями за половиною довжини хвилі. Рівність амплітуд забезпечено раціональним вибором хвильового опору компенсатора. Розрахунки за формулою (4) за врахування умов розповсюдження хвиль на основі континуальної моделі рідинного дисперсного середовища дозволило отримати збільшення об'єму зони розвинутої кавітації на 35–45 %.

У четвертому розділі подано результати модельного дослідження енергетики процесу акустичної обробки середовищ, відмінних за фізико-механічними властивостями та застосуванням. Важливим в оцінці енергій є залежність сумарної енергії від інтенсивності сплескування бульбашок та зв'язок із функціональною залежністю радіуса кавітаційної бульбашки від часу. Ця залежність визначається режимами ультразвукового впливу (частота й амплітуда звукового тиску) і фізичними властивостями оброблюваного середовища, такими як щільність, поверхневий натяг та реологічними властивостями. Енергія, що концентрується в контактній зоні «перетворювач кавітатора – середовище», є головним чинником досягнення бажаного результату забезпечення ефективного проходження процесу обробки.

Множинне перетворення енергії ультразвукових коливань спричиняє значні труднощі у встановленні оптимальних режимів обробки. Тому, для розробки теоретичних основ використання кавітаційного способу обробки технологічного середовища та визначення раціональних параметрів кавітаційного апарата, було визначено та послідовно враховано етапи перетворення енергії.

Під час кавітації щільність енергії звукового поля трансформується у високу щільність енергії всередині бульбашки і біля неї, яка з часом сплескується. За виникнення в рідині ультразвукової кавітації, її акустичні властивості істотно змінюються, що потребує зміни режиму і параметрів перенесення енергії від ультразвукового випромінювача в технологічне середовище. Розглядом хвильового процесу обробки середовища приймалася умова визначення енергії обробки технологічного середовища з метою реалізації внутрішнього резонансу системи «кавітатор – середовище».



**Рисунок 8 – Проходження та відбивання падаючої хвилі в системі «кавітаційний апарат – компенсатор – технологічне середовище»:**  
**1 – кавітатор; 2 – компенсатор;**  
**3 – середовище**

Здійснено дослідження енергії обробки технологічного середовища за умови гармонійної та імпульсної дії акустичного апарата. Виявлено, що під час кавітації щільність енергії звукового поля трансформується у високу щільність енергії всередині бульбашки. Обґрунтовано загальний підхід до визначення енергії процесу обробки технологічного середовища.

Приведені аналітичні залежності для визначення енергії за гармонійним силовим навантаженням, які враховують процеси взаємодії акустичного апарата із технологічним середовищем.

Під час визначення енергії, що передається від кавітаційного апарата до технологічного середовища в контактній зоні, розглядалися два можливих варіанти їхньої взаємодії:

- спільні гармонійні коливання системи «кавітатор – оброблювальне середовище»;
- негармонійні (імпульсні) коливання системи «кавітатор – оброблювальне середовище».

За перших умов робота контактної зони для одного періоду коливань:

$$A_k = \int_0^{2\pi/\omega} F_k \dot{x} \sin \alpha \cos \omega t dt, \quad (5)$$

де  $F_k$  – контактна сила, що має зсув фази на кут  $\varphi$  відносно амплітуди контактної зони;  $\dot{x}$  – швидкість коливань контактної зони.

Враховуючи, що сила  $F_k = p_k \cdot S$ , де  $p_k$  – тиск, який у контактній зоні площею  $S$  визначено за формулою:

$$p_k = V_0 \rho \omega \sqrt{\frac{(\sin kl \cos \beta l)^2 - (\cos kl \sin \beta l)^2}{(k^2 + \beta^2) [(\cos kl \cos \beta l)^2 + (\sin kl \sin \beta l)^2]}}. \quad (6)$$

Вираз (6) під коренем враховує вплив хвильових процесів технологічного середовища на характер та величину тиску. Після виділення із (6) дисипативної складової опору середовища і позначення її через  $\mu$ , а також нескладних перетворень з урахуванням (5) отримано вираз для роботи контактної зони:

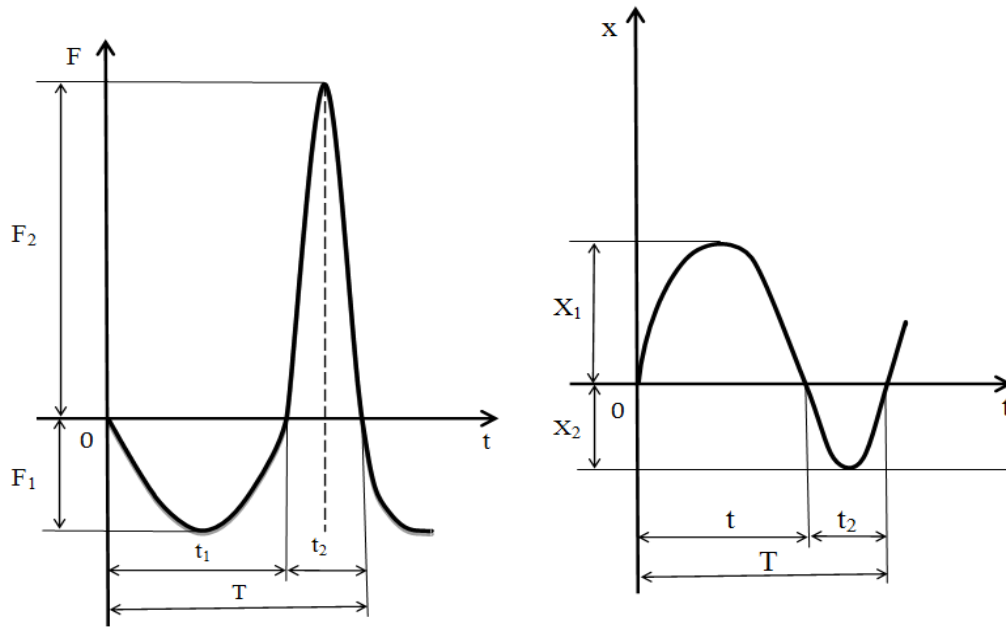
$$A_k = \pi m_c x_0^2 \omega^2 \mu, \quad (7)$$

де  $m_c$  – маса технологічного середовища;  $x_0$  – амплітуда контактної зони;  $\mu$  – хвильовий коефіцієнт впливу дисипативних сил технологічного середовища на величину контактного тиску. Тоді середня потужність кавітатора  $P_{cp}$ :

$$P_{cp} = 0,5 m_c x_0^2 \omega^2 \mu. \quad (8)$$

Формули (7) і (8) застосовано для визначення параметрів загальної роботи і потужності контактної зони у розгляді гармонійних коливань системи «кавітатор – оброблювальне середовище».

За умови реалізації імпульсного навантаження (рис. 9) поняття амплітуди коливань втрачає своє тлумачення, тому що режим вже не гармонійний, а імпульсний (асиметричний).



**Рисунок 9 – Форма зміни сили (F) і переміщення (x) у контактній зоні за умови імпульсної дії кавітаційного апарата на технологічне середовище**

За такого режиму застосовується поняття «переміщення» у відповідні відрізки часу:  $t_n = t_1 + t_2$ , де  $t_1$  – частина періоду при переміщенні  $X_1$ , а  $t_2$  – при  $X_2$ . Позначивши  $\alpha = t_1 / t_2$  і  $\omega_{cp} = 2\pi / t_n$  – осереднене значення частоти;  $F_1, F_2$  – амплітуди сил. Тоді напруження у відповідні періоди коливань у контактної зони мають такий вираз:

$$\sigma(t) = \begin{cases} \sigma_c \sin\left(\frac{\pi}{t_1} t\right), 0 < t \leq t_1; \\ -\sigma_p \sin\left[\frac{\pi(t-t_1)}{T-t_1}\right], t_1 < t \leq T \end{cases} \quad (9)$$

Зі співвідношення  $\sigma_c \sin(\pi / t_1) = \sigma_p \pi / (T - t_1)$ , було визначено зв'язок між напруженнями стискування технологічного середовища і напруженнями розтягу в зоні реалізації імпульсної зміни сили:

$$\sigma_c = \sigma_p (1 - 2) / k_t, \quad (10)$$

де коефіцієнт  $\alpha$  є асиметрією часу дії на стискування та розтягу бульбашки:

$$k_t = t_1 / T. \quad (11)$$

Для визначення деформації  $\varepsilon$  закон зміни напруження набуде вигляду:

$$\sigma^*(t) = E\varepsilon^*(t)(1 + i\gamma), \quad (12)$$

де  $\gamma$  – коефіцієнт опору (дисипації), який визначається за умови:

$$\gamma = 2\pi\Delta W / W, \quad (13)$$



де  $\Delta W$ ,  $W$  – енергія розсіювання і потенціальна відповідно;  $i = \sqrt{-1}$  – уявна одиниця, що є зсувом фаз між пружною і непружною (дисипативною) складовими загального опору.

За використання (12) отримано вираз для зміни деформації за законом:

$$\varepsilon^* = \sigma^*(t) / E(1 + i\gamma) = \sigma^*(t)(1 - i\gamma) / E(1 + i\gamma), \quad (14)$$

де

$$\sigma^*(t) = \begin{cases} \sigma_c e^{i\pi t/t_1}, 0 \leq t \leq t_1; \\ -\sigma_p e^{i\pi(t-t_1)/(T-t_1)}, t_1 \leq t \leq T \end{cases}. \quad (15)$$

Враховуючи прийнятий закон зміни напружень (12) та залежність (15) після перетворень для відповідних часових змін імпульсу сили (рис. 9), залежність деформації від параметрів набуде такого вигляду:

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} \frac{\sigma_c \sin(\pi t/t_1)}{E(1 + i\gamma^2)} - \frac{\gamma \sigma_p \cos(\pi t/t_1)}{E(1 + i\gamma^2)}, 0 \leq t \leq t_1; \\ \frac{\gamma \sigma_p \cos[\pi(t-t_1)/(T-t_1)]}{E(1 + i\gamma^2)} - \frac{\sigma_c \sin[\pi(t-t_1)/(T-t_1)]}{E(1 + i\gamma^2)}, t_1 \leq t \leq T \end{cases}. \quad (16)$$

Енергія, що акумулюється в контактній зоні за умов імпульсного навантаження із урахуванням (15) і (16), являє собою добуток напруження (тиску) на швидкість деформації за період  $T$ :

$$E_{k.im.} = \int_0^T \sigma(t) \dot{\varepsilon}(t) dt = \int_0^{t_1} \sigma(t) \dot{\varepsilon}(t) dt + \int_{t_1}^T \sigma(t) \dot{\varepsilon}(t) dt. \quad (17)$$

Після розв'язання (17) отримано вираз для енергії:

$$E_{k.im.} = \frac{\pi \sigma_c^2 \gamma}{2E(1 + \gamma^2)} \left[ 1 + (1 - k_t)^2 / k_t^2 \right]. \quad (18)$$

Новизна отриманого виразу полягає в тому, що витрати енергії кавітаційного процесу мають дві складові: енергії на хвилі стискування  $E_{cm}$  (19) й енергії на хвилі розтягу  $E_p$  (20):

$$E_{cm} = \frac{\pi \sigma_{cm}^2 \gamma}{2E(1 + \gamma^2)}; \quad (19)$$

$$E_p = \frac{\pi \sigma_{cm}^2 \gamma}{2E(1 + \gamma^2)} \left[ (1 - k_t)^2 / k_t^2 \right]. \quad (20)$$

При імпульсі тиску  $P(t)$  за умови зміни часу  $\tau \rightarrow 0$  енергію зовнішніх сил, передану газу в бульбашці в ідеальній рідині, можна прийняти рівною:

$$E_k = P_k \cdot \Delta V, \quad (21)$$

де  $\Delta V$  – зміна об'єму бульбашки.

Маса газу в бульбашці при заданому рівноважному тиску пропорційна початковому об'єму бульбашки. Отримані аналітичні залежності дали змогу оцінити за числовими значеннями (18) – (21) ефективність процесу кавітації. Ефективність кожного із цих процесів можна оцінити окремо. Якщо позначити енергію ударних хвиль через  $E_y$ , то відношення:

$$\chi = E_y / E_k, \quad (22)$$

визначає частку потенційної енергії, запасеної кавітаційними бульбашками, яка перейшла в енергію ударних хвиль. Ексергетичний ККД:

$$K_e = E_{ex} / E_{eux}, \quad (23)$$

де  $E_{ex}$ ,  $E_{eux}$  – ексергія вхідних і вихідних потоків. Параметр, що визначає щільність енергії,  $\Delta W_{num}$  визначається за формулою:

$$\Delta W_{num} = A_k / V_k, \quad (24)$$

де  $A_k$  – робота, яку здійснюють усі бульбашки максимального радіуса  $R_m$  під час їх сплескування.

До критеріїв оцінки процесу можна віднести також відношення: швидкості коливань випромінюючої поверхні акустичного апарата в контактній зоні  $V_{k.a}$  до швидкості в середовищі  $V_{k.c}$  від процесу зародження бульбашок кавітаційної області до процесу їхнього сплескування:

$$K_v = V_{k.a} / V_{k.c}. \quad (25)$$

часу кавітації  $\tau$  до характерного періоду ультразвукової хвилі  $T$ :

$$K_\tau = \tau / T. \quad (26)$$

Відношення хвильового опору середовища в режимах кавітації,  $\rho_k c_k$  до хвильового опору початкового стану середовища,  $\rho_c c_c$ :

$$k_c = \rho_k c_k / \rho_c c_c. \quad (27)$$

Формули для встановлення амплітуди швидкості  $\nu$  та амплітуди прискорення  $a$  визначалися за залежностями (28):

$$\begin{aligned} \nu &= \sqrt{\frac{2I}{\rho c}}, \quad \nu = \nu(\omega, I, \rho, c), \\ a &= \omega \sqrt{\frac{2I}{\rho c}}, \quad a = a(\omega, I, \rho, c), \end{aligned} \quad (28)$$

де  $I$  – інтенсивність випромінювання енергії.

На рис. 10, а подано графіки зміни амплітуди (мм), швидкості (м/с) та прискорення (м/с<sup>2</sup>) коливань й акустичного тиску (10<sup>2</sup> Па) залежно від інтенсивності (Вт/см<sup>2</sup>) та частоти (4\*10<sup>3</sup>Гц) коливань поверхні випромінювання акустичного апарата, що розраховані для значень (рис. 10, б).

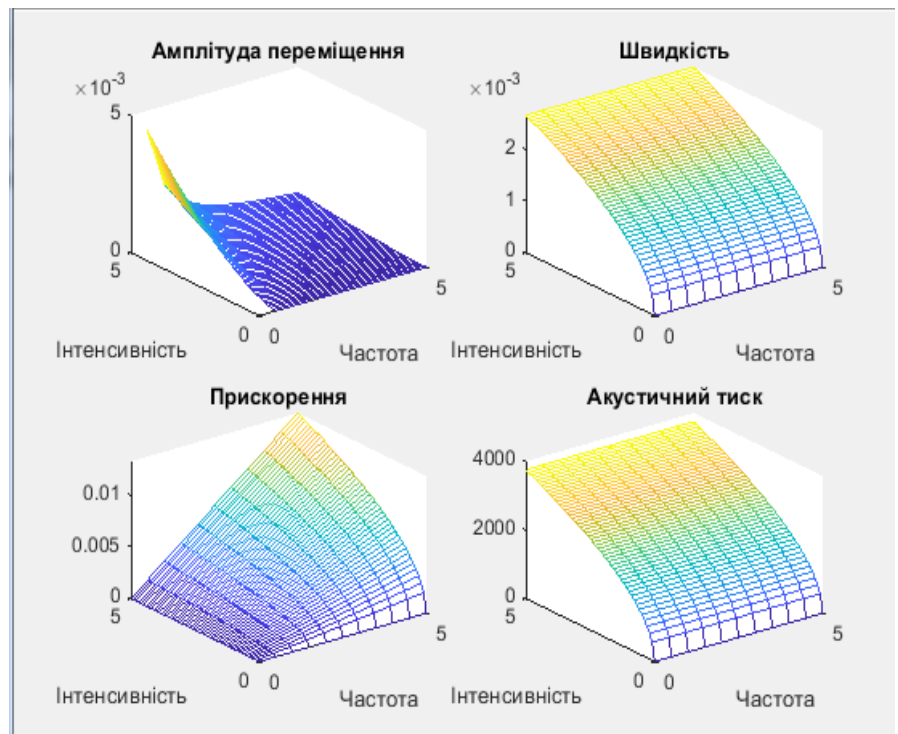
У п'ятому розділі приведено результати аналітичних досліджень руху системи «кавітатор – технологічне середовище» на основі застосування поетапної перехідної фізичної моделі від дискретного до континуального проходження акустичної обробки технологічного середовища.

Перехід від руху одинокої бульбашки (дискретна модель) до сплескування їх великої кількості (кавітаційна область, континуальна модель). Наглядним супроводом поведінки бульбашок може слугувати еволюція рівнів складності формування кавітаційної області (рис. 11).

Корпускулярна теорія опису

кавітаційного процесу поведінки бульбашки використовувалася для визначення тиску, резонансної частоти та інших параметрів.

У визначенні руху бульбашки у кавітаційному середовищі як математичну модель прийнято рівняння:



а

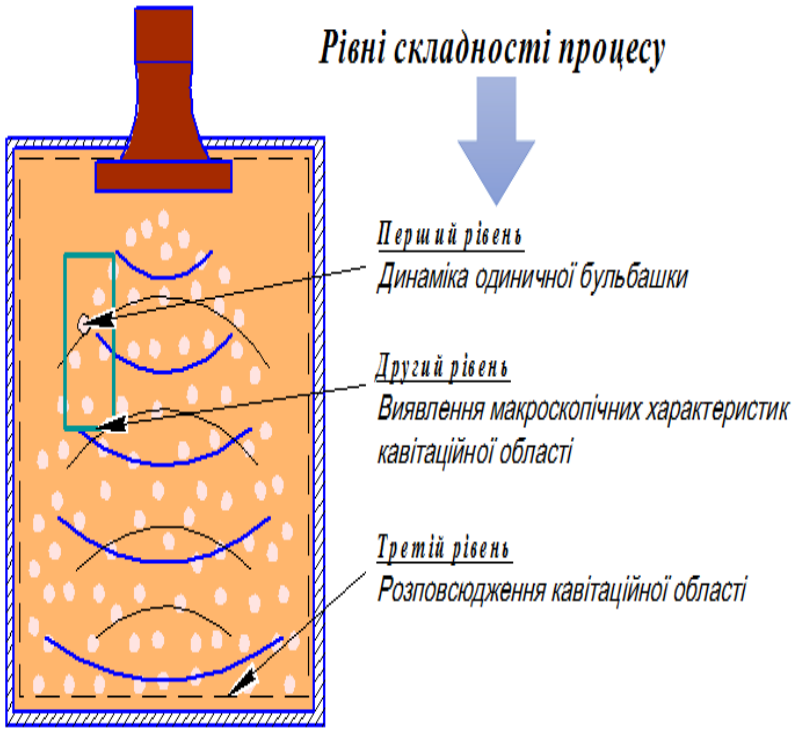
Входные данные		Расчетные	
c= 1500	скорость распространения упругой	w= 6.28319	угловая
f= 1000000	частот	T= 1e-06	период
lambda= 0.015	длина волны	A= 0.00018	амплитуда смещения частиц в клетке
rho= 936	плотно	vm= 0.11935	амплитуда скорости частиц в клетке
eta= 0.82E-3	вязкос	a= 749914	амплитуда ускорения частиц в клетке
sigma= 73.0E-3	поверхностное	P= 167571	акустическое давление частиц
I= 1E4	интенсивность ультразвуковой		
Dk= 5E-4	диаметр		

Построение			
Диапазон частот	начальное	0	шаг
	конечное	5	0.5
Диапазон интенсивности волны	начальное	0	шаг
	конечное	5	0.1

б

Рисунок 10 – Зміна параметрів кавітаційного процесу



**Рисунок 11 – Рівні складності формування кавітаційної області**

$$m\ddot{x}_q = m_c \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) (g - \ddot{x}_c) + F_{cp}, \quad (29)$$

де  $m$  – маса бульбашки;  $m_c$  – маса середовища в об’ємі, рівному об’єму бульбашок;  $\rho_b$  – щільність бульбашки;  $\rho_c$  – щільність середовища;  $\ddot{x}_b$  – прискорення бульбашки відносно середовища;  $\ddot{x}_c$  – прискорення середовища в точці, що збігається з центром ваги бульбашки;  $g$  – прискорення сили тяжіння;  $F_{cp}$  – сила, з якою середовище діє на бульбашку.

Рівняння (29) описує рух бульбашки за умови зменшення тертя в місцях контакту бульбашок між собою. Бульбашки під дією гравітаційних сил, звільнившись

від тертя, займають вільне місце. Вважаємо, що на початковому етапі переважають сили сухого тертя. На кінцевому етапі переважають сили в’язкого тертя. З огляду на це, сила  $F_{cp}$ , з якою середовище діє на бульбашку, буде визначати сили сухого або в’язкого опору. Після розв’язання рівняння (29) отримано рішення (30), яке описує відношення амплітуди руху бульбашки  $A_b$  до амплітуди руху середовища  $A_c$ :

$$\frac{A_b}{A_c} = \frac{1 + \frac{i}{\Omega} \left( 1 + r \sqrt{\frac{\rho\omega}{2\eta}} \right)}{\frac{m + m_{nn}}{m_c + m_{nn}} + \frac{i}{\Omega} \left( 1 + r \sqrt{\frac{\rho\omega}{2\eta}} \right)}, \quad (30)$$

де  $\Omega = \frac{f}{fg} = \frac{f(m_c + m_{nn})}{3\eta r} = \frac{\omega(m_c + m_{nn})}{6\pi\eta r}$ ,  $f$  – частота коливань;  $fg$  – характеристична частота.

Для визначення відношення амплітуд коливань бульбашок через параметри середовища визначимо модуль співвідношення (30). Введемо позначення

$$\frac{m + m_{nn}}{m_c + m_{nn}} = k_m, \quad \frac{\Omega}{(1 + r \sqrt{\rho\omega/2\eta})} = k_f.$$

Тоді відношення амплітуд коливань можна виразити так:

$$\frac{A_q}{A_{cp}} = \frac{1}{k_m^2 + 1/k_f^2} \sqrt{k_m^2 + \frac{k_m^2}{k_f^2} + \frac{1}{k_f^2} + \frac{1}{k_f^4}}. \quad (31)$$

Отримані залежності (31) вказують на те, що потрібно враховувати в оцінці ефективності та швидкодії кавітації умови взаємодії між бульбашками та мати чітке уявлення про ступінь впливу на процес складових тиску, швидкості та співвідношення щільності середовища та бульбашки, що і здійснено у роботі. Застосування континуальної теорії для опису руху бульбашок за розташування акустичного апарата під оброблювальним технологічним середовищем подано на рис. 12.

У пророблених дослідженнях використано два хвильових рівняння руху технологічного середовища:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} + \frac{\partial^3 x}{\partial z^2 \partial t}; \quad (32.1)$$

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = c^2 (1 + i\gamma) \frac{\partial^2 x}{\partial z^2}. \quad (32.2)$$

Рівняння залежності (32.1) відображає пружно-в'язкі середовища за умови частото-залежного розсіювання енергії, а друге – пружно-в'язкі середовища за умови частото-незалежного розсіювання енергії.

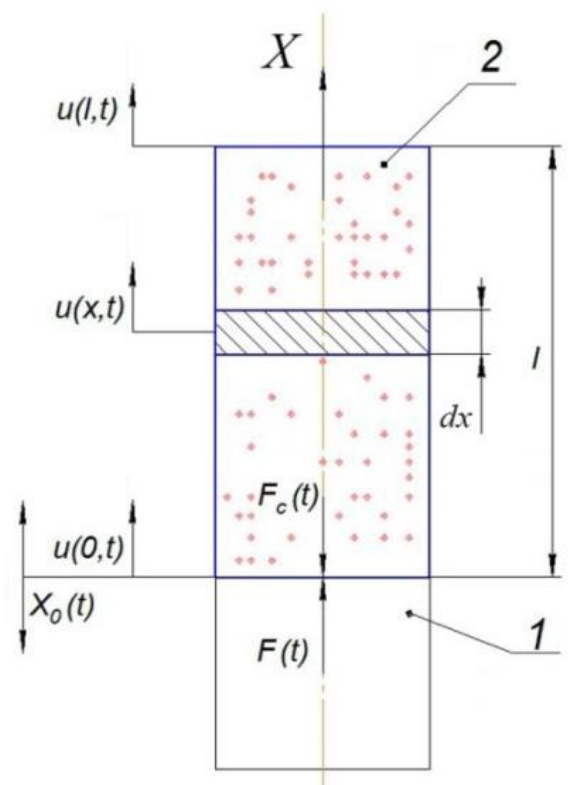
Такий підхід зумовлений наявністю реальних середовищ і матеріалів із різними законами зміни розсіювання енергії та оцінкою важливості й необхідності врахування розсіювання енергії у хвильовому процесі ультразвукової кавітаційної обробки відмінних за реологічними властивостями середовища за різних режимів роботи.

Розв'язання рівняння (32.1) подається функцією:

$$x = x_0 e^{\pm \alpha x + i(\pm kx - \omega t)} \quad (33)$$

де  $x_0$  – амплітуда коливань у зоні контакту кавітатора і середовища;  $\alpha$  – коефіцієнт згасання хвилі в середовищі, яке знаходиться під дією акустичного навантаження;  $x$  – координата, за напрямком якої розповсюджується хвиля в середовищі;  $K$  – хвильове число.

Для випадку гармонійних коливань системи переміщення  $u$  по координаті  $x$  змінюється за законом:



**Рисунок 12 – Розрахункова схема руху бульбашок за континуальною моделлю:**

**1 – акустичний випромінювач;**

**2 – технологічне середовище**

$$u = u(x) \sin(\omega t) \quad (34)$$

Підстановка виразу (34) у рівняння (32.1) дає диференціальне рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами, розв'язання якого має вигляд:

$$u(x) = (A \cos(\bar{K}x) + B \sin(\bar{K}x)), \quad (35)$$

де  $A, B$  – постійні інтегрування, що знаходяться з граничних умов, а  $\bar{K}$  – комплексна постійна розповсюдження хвилі, котра з урахуванням впливу в'язкого тертя визначається залежністю:

$$\bar{K} = k - i\beta = \frac{\omega}{c} - i \left( \frac{2\omega^2}{3\rho c^3} \right), \quad (36)$$

де  $\frac{\omega}{c}$  – дійсна частина хвильового коефіцієнта,  $i \left( \frac{2\omega^2}{3\rho c^3} \right)$  – уявна частина, що оцінює вплив розсіювання енергії (дисипацію). Тоді з урахуванням (35) вираз для переміщення шару середовища  $u$  набуде вигляду:

$$u = [A \cos(\bar{K}x) + B \sin(\bar{K}x)] \sin(\omega t). \quad (37)$$

Після диференціювання виразу (37) за часом отримаємо вираз для коливальної швидкості  $v$ :

$$v = \omega [A \cos(\bar{K}x) + B \sin(\bar{K}x)] \cos(\omega t). \quad (38)$$

Після диференціювання виразу (38) за часом отримаємо вираз для визначення прискорення  $a$ :

$$a = -\omega^2 [A \cos(\bar{K}x) + B \sin(\bar{K}x)] \sin(\omega t). \quad (39)$$

Тиск звукової хвилі,  $p(x)$ :

$$p(x) = -\frac{\rho \omega^2}{\bar{K}} [A \sin(\bar{K}x) - B \cos(\bar{K}x)]. \quad (40)$$

Постійні інтегрування  $A$  і  $B$  визначено із початкових і кінцевих умов розповсюдження хвилі в шарі середовища (рис. 12). Як початкову умову використано значення швидкості коливань ультразвукового перетворювача в зоні контакту із середовищем, тобто на випромінюючій поверхні. Прийmemo межу розподілу контактної зони системи «перетворювач – шар середовища» за початок відліку. Тоді за умови, що  $x=0$ :

$$v = v_0 \quad (41)$$

За умови, що  $x=l$  має місце межа розподілу системи «середовище – газ», на якій, згідно з прийнятими допущеннями, коефіцієнт відбиття хвилі дорівнює одиниці, і

позаяк  $\rho_c \neq \rho_{\text{впл}} c_{\text{впл}}$ , то маємо на межі системи «середовище – газ», вузол звукового тиску. Таким чином, за умови  $x = l$ :

$$p(x) = 0 \quad (42)$$

Після підставлення граничних умов (41) і (42) у рівняння (38) і (40) отримано вирази для постійних інтегрування  $A$  і  $B$ :

$$A = \frac{v_0}{\omega}; \quad B = \frac{v_0}{\omega} \frac{\sin(Kl)}{\cos(Kl)}. \quad (43)$$

Вираз для звукового тиску в шарі середовища, залежно від товщини шару, отримано шляхом підстановки граничних умов (42) у рівняння (40):

$$p(x) = \frac{\frac{v_0 \rho \omega}{K} \sin(\bar{K}(l-x))}{\cos(\bar{K}l)}. \quad (44)$$

Із (44) випливає, що тиск залежить від швидкості в контактній зоні, щільності середовища  $\rho$ , частоти коливань кавітатора  $\omega$ , поточного перерізу  $l-x$ , у якому визначається тиск  $p(x)$ , та комплексної постійної розповсюдження хвилі  $\bar{K}$ .

Для визначення тиску в контактній зоні приймається умова, що  $x=0$ . Тоді вираз (44) матиме вигляд:

$$P = \frac{v_0 \rho \omega}{K} \operatorname{tg} \bar{K}l, \quad (45)$$

або з урахуванням (45):

$$P = v_0 \rho c K_{\text{хв}}, \quad (46)$$

де

$$K_{\text{хв}} = \sqrt{\frac{[\sin kl \operatorname{ch} \beta l]^2 - [\cos kl \operatorname{sh} \beta l]^2}{(k^2 + \beta^2)[(\cos kl \operatorname{ch} \beta l)^2 + (\sin kl \operatorname{sh} \beta l)^2]}}. \quad (47)$$

Отриманий вираз (46) дає змогу визначити амплітуду ультразвукового тиску залежно від в'язкості і товщини шару середовища для різних рідин. Параметр, що входить до залежності (46) коефіцієнт  $K_{\text{хв}}$  (47), враховує вплив хвильових процесів, які є в середовищі при її коливаннях. Визначення тиску для моделі з частотно-незалежним розсіюванням енергії та розв'язання рівняння (32.2) представлено комплексною хвильовою функцією:

$$u(z, t) = (A_1 e^{kz} + A_2 e^{-kz}) e^{i\omega t}. \quad (48)$$

Переміщення  $u$  визначається добутком двох функцій, одна з яких залежить від переміщення  $x(x) = A_1 e^{kx} - A_2 e^{-kx}$ , інша – від часу  $T(t) = e^{i\omega t}$ .

У розв'язку (48)  $A_1$  та  $A_2$  – постійні, зумовлені граничними умовами:  
при  $z=0$

$$u(0,t) = x e^{i\omega t}, \quad (49)$$

де  $x$  – розкладання у ряд Фур'є переміщення робочого органу;  
при  $z=l$

$$\sigma|_{z=l} = 0. \quad (50)$$

Тоді, прирівнюючи коефіцієнти за однакових гармонік, отримуємо:

$$A_1 + A_2 = x;$$

$$A_1 e^{l(\alpha+i\beta)} - A_2 e^{l(\alpha+i\beta)} = 0,$$

де  $\beta$  – коефіцієнт впливу на довжину цієї самої хвилі.

Із цього співвідношення знаходимо:

$$A_1 = \frac{x e^{-l(\alpha+i\beta)}}{e^{-l(\alpha+i\beta)} + e^{l(\alpha+i\beta)}}; \quad (51)$$

$$A_2 = \frac{x e^{l(\alpha+i\beta)}}{e^{-l(\alpha+i\beta)} + e^{l(\alpha+i\beta)}}. \quad (52)$$

Тиск середовища в контактній зоні акустичного апарата, після відповідних перетворень:

$$p(0,t) = \rho l A_1 \omega^2 \sqrt{\chi_1^2 + \chi_2^2}, \quad (53)$$

де  $A_1$  – амплітуда коливань контактної зони;  $\chi_1$  і  $\chi_2$  – хвильові коефіцієнти:

$$\chi_1 = \frac{\alpha s l 2\alpha l + \beta \sin 2\beta l}{l(\alpha^2 + \beta^2)[cl 2\alpha l + \cos 2\beta l]}; \quad (54)$$

$$\chi_2 = \frac{\alpha \sin 2\beta l - \beta s l 2\alpha l}{l(\alpha^2 + \beta^2)[cl 2\alpha l + \cos 2\beta l]}. \quad (55)$$

Аналогічно застосовано континуальну теорію для опису руху бульбашок за умови розміщення поверхні випромінювання акустичного апарату над оброблювальним технологічним середовищем. За отриманими виразами були здійснені комп'ютерні дослідження параметрів кавітаційного процесу. Сутність досліджень полягала у визначенні ступеня впливу реологічних властивостей на зміну акустичних та динамічних параметрів середовища з метою підвищення ефективності

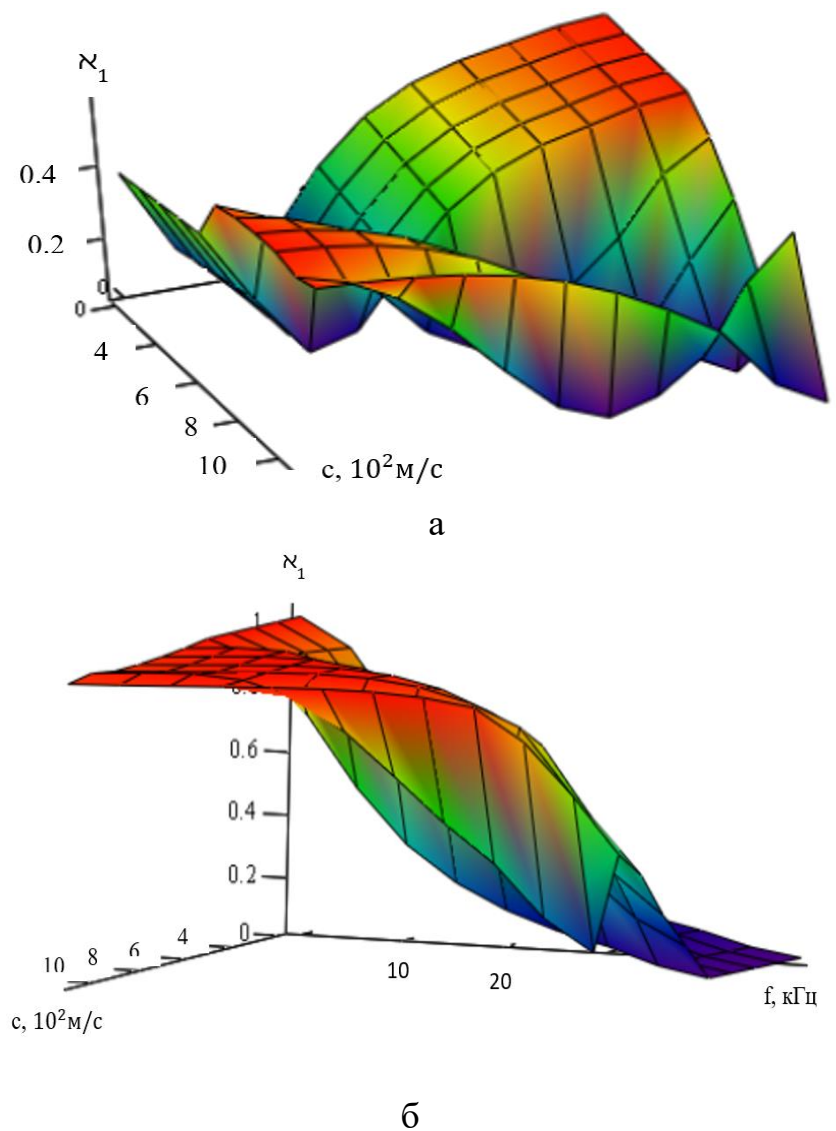


проходження робочого процесу акустичної кавітаційної обробки технологічних середовищ.

Дослідження здійснено у три етапи. На першому етапі було встановлено достовірність прийнятих фізичних та математичних моделей шляхом розрахунку амплітуд коливань, визначення їх якісної картини та встановленням діапазону числових значень. Були вибрані типові технологічні середовища, характеристики яких визначалися, за своїми результатами отриманих даних. Другий етап полягав у виконанні розрахунків на основі використання змінних у часі реологічних та акустичних параметрів. При цьому було встановлено діапазон зміни параметрів із забезпеченням числових значень енергетичних характеристик, які зумовлюють виконання кавітаційного процесу. Третій етап досліджень передбачав аналіз результатів та кореляцію параметрів на виконання умов, зазначених критеріями. Здійснено розрахунки та побудовано поверхні відгуку, що свідчать про складну форму зміни хвильових коефіцієнтів (рис. 13).

При цьому коефіцієнт  $\kappa_1$ , що визначає вплив реактивного опору (пружно-інерційних властивостей) у певній області прийнятих числових значень наближається до нуля, тобто за таких умов це біля резонансний режим. Коефіцієнт  $\kappa_2$ , що визначає вплив активного опору (дисипативних властивостей), впливає на зменшення як тиску, так й інтенсивності коливань. Отримано залежності зміни хвильових коефіцієнтів та контактного тиску від зміни швидкості розповсюдження хвиль на етапах зародження бульбашок до кінцевої стадії сплескування (рис. 14).

Варто відзначити характер зміни хвильових коефіцієнтів за інших числових значень та зміни їх у часі. Так, один із коефіцієнтів  $\chi^{1(c)}$  (червона крива) не змінює свій знак протягом усіх стадій процесу (рис. 14).



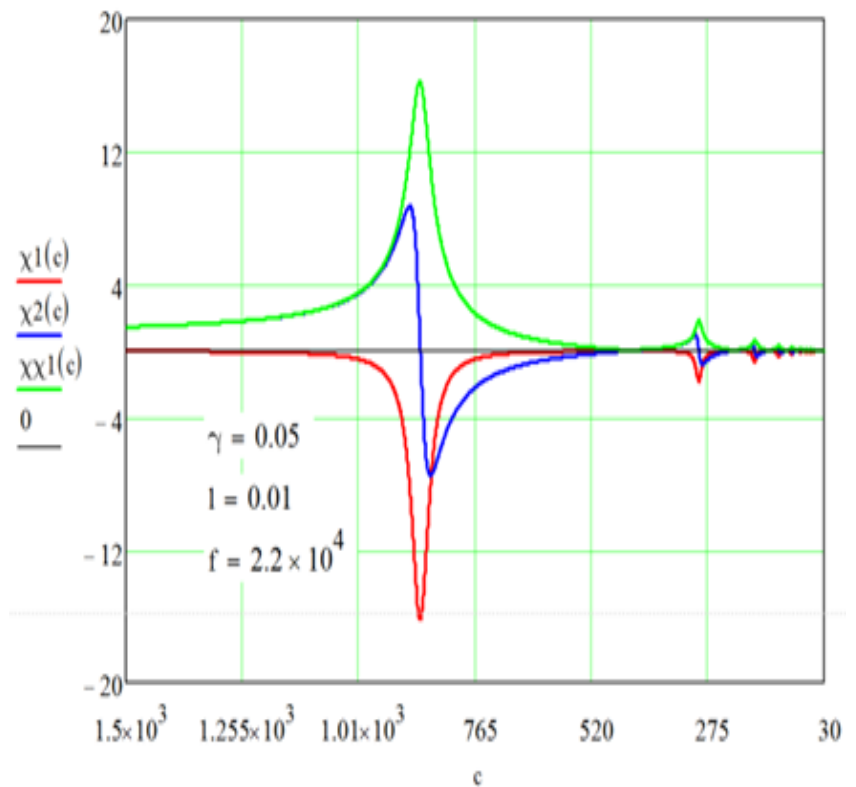
**Рисунок 13 – Поверхні відгуку хвильових коефіцієнтів: а -  $\kappa_1$ ; б -  $\kappa_2$**

Другий коефіцієнт  $\chi^{2(c)}$  (синя крива) має ділянки як із позитивними, так і з від'ємними значеннями. Наявність резонансних зон залежить від низки параметрів і, в тому числі, від характерного розміру кавітаційної камери у напрямку розповсюдження хвиль. Результати проведених досліджень та наведені вище значення відкривають можливість реального їх використання в оптимізації режимів і параметрів кавітаційного апарата, що дозволить інтенсифікувати процес обробки різних середовищ.

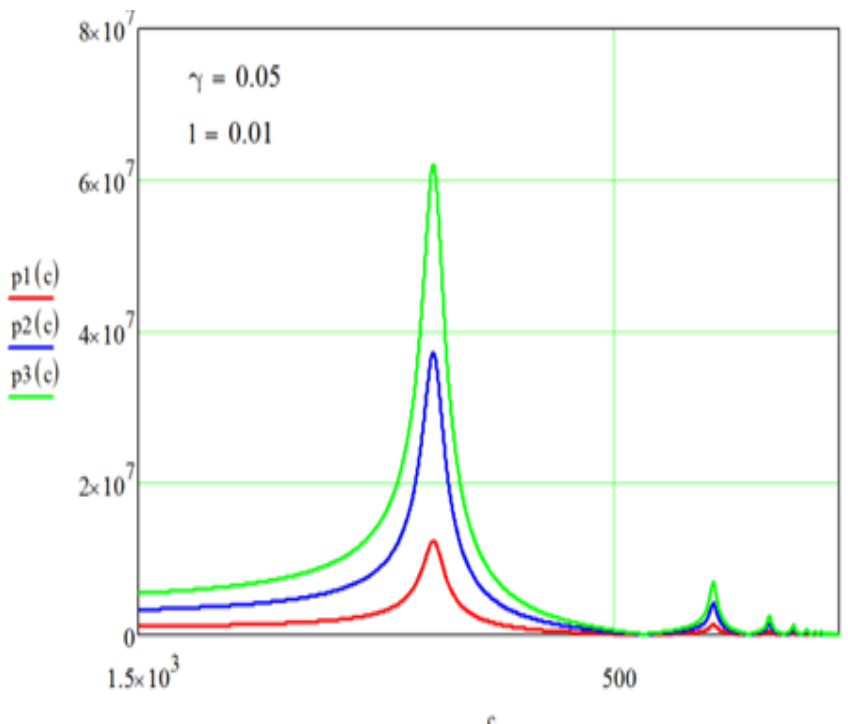
Отримано залежності зміни величини тиску в напрямку розповсюдження хвильового процесу для різних середовищ та амплітуд коливань (рис. 15).

У шостому розділі наведено основні положення створення синергетичних систем «ультразвукова установка – технологічне середовище», запропоновано рішення вдосконалення їхніх режимів та параметрів. Запропоновано алгоритми та методики розрахунку, побудову яких здійснено у такій послідовності:

– рух системи «ультразвукова установка – технологічне середовище» представлено в розрахунковій моделі, як єдина модель, застосування якої дає змогу за



a



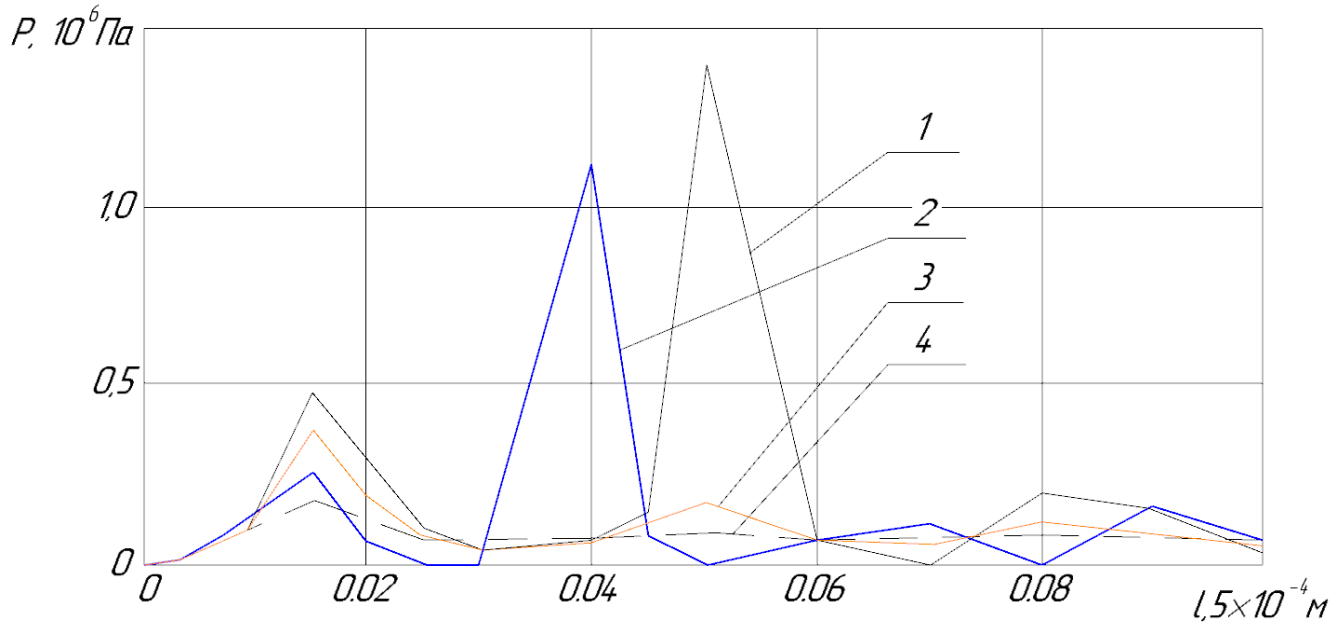
б

Рисунок 14 – Залежності зміни хвильових коефіцієнтів (а) та контактного тиску (б) від швидкості розповсюдження хвиль у газорідному середовищі для трьох значень амплітуд коливань контактної зони:  
—  $A = 4 \cdot 10^{-6}$  м; —  $A = 12 \cdot 10^{-6}$  м; —  $A = 20 \cdot 10^{-6}$  м

вказаних у постановці загального завдання умов досягти екстремуму критеріїв оптимальності;

– вибір структурних схем передач енергії від кавітатора до середовища, у яких реалізовані раціональні рішення (структурний синтез);

– визначення оптимальних динамічних параметрів кавітаційного процесу (динамічний синтез).



**Рисунок 15 – Зміна тиску в напрямку розповсюдження хвильового процесу для різних середовищ (амплітуда коливань контактної зони  $A=0,4\text{мм}$ ): 1-вода; 2-етиловий спирт; 3 – трансформаторне масло; 4- олівкова олія**

Швидкість зміни об'єму бульбашок  $V$  можна подати такою функціональною залежністю:

$$V(t) = f(t, R_0, l, n, \rho_l, \mu_l, \sigma, \rho_g, \mu_g, p_3, p_6) \quad (56)$$

Приймаючи час  $t$ , радіус бульбашки  $R_0$ , щільність  $\rho_l$ , як основні незалежні параметри за розмірністю та використовуючи основні положення теорії розмірностей, всі параметри (56) приведені до безрозмірного виду відносно утвореного об'єму бульбашок:  $t$ -час,  $[T]$ ;  $l$  – характерна довжина у напрямку хвильового руху бульбашок,  $[L]$ ;  $R_0$  – початковий радіус бульбашки,  $[L]$ ;  $n$  – кількість бульбашок на одиницю об'єму,  $\left[\frac{1}{L^3}\right]$ ;  $\rho_L$  – щільність середовища,  $\left[\frac{M}{L^3}\right]$ ;  $\mu_L$  – в'язкість,  $\left[\frac{M}{LT}\right]$ ;  $\sigma$  – поверхневий натяг,  $\left[\frac{M}{T^2}\right]$ ;  $\rho_g$  – щільність газу,  $\left[\frac{M}{L^3}\right]$ ;  $\mu_g$  – в'язкість газу,  $\left[\frac{M}{LT}\right]$ ;  $p_3$  – зовнішній тиск,  $\left[\frac{M}{LT^2}\right]$ ;  $p_6$  – тиск всередині бульбашок,  $\left[\frac{M}{LT^2}\right]$ . Тоді функціональну залежність (56) можна представити в безрозмірному вигляді:

$$\frac{V}{\frac{4}{3}\pi R_0^3/t} = f\left(\frac{l}{R_0}; nR_0^3; \frac{\mu_l}{\rho_l R_0^2/t}, \frac{\sigma}{\rho_l R_0^3/t^2}, \frac{\rho_e}{\rho_l}, \frac{\mu_e}{\rho_l R_0^2/t}, \frac{p_3}{\rho_l R_0^3/t^2}, \frac{p_3 - p_6}{\rho_l R_0^3/t^2}\right) \quad (57)$$

Тепер наступною процедурою аналізу (57) є оцінка важливості врахування складових цієї залежності на швидкість утворення об'єму кавітуючого технологічного середовища. Якщо прийняти умову часу сплескування  $\tau_c$  бульбашки у вигляді:

$$\tau_c = 0.915 R_0 \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_3 - \rho_6}}, \quad (58)$$

то залежність (57) можна привести до вигляду:

$$\frac{V}{\frac{4}{3}\pi R_0^3/\tau_c} = f\left(l; N; \frac{\mu_l}{\rho_l R_0^2/\tau_c}, \frac{\sigma}{\rho_l R_0^3/\tau_c^2}, \frac{\rho_e}{\rho_l}, \frac{\mu_e}{\rho_l R_0^2/\tau_c}, \frac{p_3}{p_3 - p_6}, \frac{t^2}{\tau_c^2}\right) \quad (59)$$

Для середовищ з малою в'язкістю на стадії сплескування бульбашок можна знехтувати в'язкістю та поверхневим натягом. Тоді залежність (59) для таких умов можна спростити до вигляду:

$$\frac{V}{\frac{4}{3}\pi R_0^3/\tau_c} = f\left(l; N; \frac{p_3}{p_3 - p_6}, \frac{t^2}{\tau_c^2}\right) \quad (60)$$

Відношення об'єму бульбашок, що не сплескувалися  $\Delta V_\partial$  (довгоживучі бульбашки), до об'єму бульбашок, які сплескуються  $\Delta V_\kappa$ , є оцінкою ефективності процесу кавітації:

$$K_{об} = \Delta V_\partial / \Delta V_\kappa. \quad (61)$$

Визначено критерії та параметри, використання яких пропонується як оцінка в алгоритмах розрахунку залежно від вихідних даних кавітатора та середовища (табл. 1).

У поданій таблиці критерії та параметри приведені для процесу обробки технологічних середовищ. Критерії визначають як оцінку енергетики процесу, так і врахування можливих змін параметрів від стадії зародження бульбашок до кінцевої стадії – сплескування бульбашок. Важливість критерію 8 полягає у достовірності вибраної швидкості кавітаційного апарата, а критерій 9 є прямим показником співвідношення часу сплескування та періоду технологічного процесу. Саме числове значення цього критерію визначає забезпечення мінімального значення критерію 7 та можливу доцільність використання імпульсного режиму навантаження на технологічне середовище.

Застосування критерію зумовлено вихідною інформацією та поставленою метою, яку сформульовано перед дослідником – для вибору моделі та параметрів, чи інженером – для створення необхідної акустичної хвильової системи конкретного технологічного процесу обробки або нового технологічного середовища. Для реалізації критеріальної оцінки обґрунтування раціонального вибору структурно-

параметричної системи «акустичний апарат – технологічне середовище» запропоновано алгоритм.

**Таблиця 1. Критерії та параметри оцінки ефективності кавітаційного процесу обробки технологічних середовищ**

№	Критерій, параметр	Аналітична залежність
1	2	3
1	Інтенсивність кавітаційного процесу за видом коливань.	
1.1	Синусоїдальні коливання, $I, \text{Вт/см}^2$	$I = \frac{p^2}{2\rho c}; \quad I = A^2 \times f^3.$
1.2	Двочастотні коливання, $I, \text{Вт/см}^2$	$I = \frac{\alpha \times A}{4\pi^2 T} \times \frac{(1+kn)^2}{2}.$
1.3	Багаточастотні коливання, $I, \text{Вт/см}^2$	$I = \frac{\alpha \times A}{4\pi^2 T} \times \frac{(1 + \sum k_i n_i)^2}{2}.$
1.4	Нелінійні (не синусоїдальні) коливання, $I, \text{Вт/см}^2$	$I = \frac{\alpha \times A}{4\pi^2 T}.$
2	Коефіцієнт синергії системи (ККД), $\kappa_c$	$\kappa_c = E_{\phi}/E_{n.x}.$
3	Швидкість зміни напруженого стану середовища у часі, $v_{н.с}, \text{Н/м}^2\text{с}$	$v_{н.с} = \frac{d\sigma}{dt}.$
4	Коефіцієнт співвідношення об'ємів бульбашок довго живучих і кавітуючих, $K_{об}$	$K_{об} = \Delta V_{\phi}/\Delta V_{\kappa}.$
5	Коефіцієнт зміни енергії у часі за весь період обробки бульбашок, $\mu, \text{Дж/с}$	$\mu = 1/T(\ln E_0 / E_k).$
6	Коефіцієнт поглинання енергії, $a_n, \text{м}^{-1}$	$a_n = P_{num}/I.$
7	Коефіцієнт співвідношення хвильових опорів кавітаційного середовища, $\kappa_{он}$	$\kappa_{он} = \frac{\rho_{\kappa} c_{\kappa}}{\rho_c c_c} = \left[ \frac{1}{1 + \frac{K \beta_n}{\beta_0}} \right]^{1/2}.$
8	Коефіцієнт співвідношення швидкостей, $\kappa_v$	$\kappa_v = v_{\phi}/c_k.$
9	Коефіцієнт співвідношення часу сплескування до часу періоду коливань, $\kappa_t$	$\kappa_t = \tau/T.$
10	Робота контактної зони, $A_{кз}, \text{Дж}$	$A_{кз} = \pi m_c x_0^2 \omega^2 \mu.$
11	Робота на утворення кавітаційних бульбашок, $A_{кб}, \text{Дж}$	$A_{кб} = \frac{4}{3} \pi R_m^3 P_0 N.$
12	Питома робота кавітатора, $\bar{A}, \text{Дж}$	$\bar{A} = \bar{P} \cdot t.$

Продовження табл. 1

1	2	3
13	Питома робота об'єму кавітуючого середовища, $A_c$ , Дж	$A_c = E_c \Delta V$ .
14	Коефіцієнт переходу акустичної енергії в енергію ударних хвиль, $\eta_y$	$\eta_y = \eta \frac{E_y T}{E_k \tau}$ .
15	Продуктивність кавітаційного процесу, $\Delta\Pi$ , $\text{м}^3/\text{с}$	$\Delta\Pi = kP/E_c$ .
16	Амплітуда переміщення бульбашки, $A_\delta$ , мкм	$A_\delta = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2I}{\rho c}}$ .
17	Амплітуда швидкості бульбашки, $v_\delta$ , мкм/с	$v_\delta = \sqrt{\frac{2I}{\rho c}}$ .
18	Амплітуда прискорення бульбашки, $a_\delta$ , мкм/с <sup>2</sup>	$a_\delta = \omega \sqrt{\frac{2I}{\rho c}}$ .
19	Власна частота коливань бульбашки (дискретна модель), $\omega_{\text{вл}}$ , рад/с	$\omega_{\text{вл}} = \sqrt{\left[ \frac{3\gamma}{\rho R_0^2} \left( P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) - \frac{2\sigma}{\rho R_0^3} + \frac{2c_{np}}{\rho R_0^3} \right] - \left( \frac{2\pi\delta_{np}}{\omega} \right)^2}$ .
20	Власна частота коливань бульбашки (континуальна модель), $\omega_{\text{вл}}$ , рад/с	$\omega_{\text{вл}} = \frac{\pi}{2l} \sqrt{\frac{(E' + iE'')(t_c)}{\rho(t_c)}}$ .
21	Відносний розмір бульбашок, $\kappa_\delta$	$\kappa_\delta = R_m/R_0$ .

Сутність алгоритму полягає у можливості варіювати не тільки вихідними параметрами та схемою розташування кавітатора відносно оброблювального середовища, а і визначити вплив змінних параметрів на максимальне значення того чи іншого критерію (табл. 1). Така технологія запропонованого алгоритму є принципово новою системою автоматичного перебору параметрів до виконання умови забезпечення конкретного критерію з огляду на поставлену технологію обробки того чи іншого середовища.

Коефіцієнт поглинання енергії (критерій 6) характеризує зміну питомої енергії  $P_{\text{num}}$  та інтенсивності ультразвуку  $I$  в опромінюваному середовищі і слугує критерієм оцінки ефективності проходження процесу акустичної обробки цього середовища. Надалі здійснено процедуру з визначення необхідного ступеня врахування фізико-механічних характеристик кавітаційного процесу для розрахунку синергетичних режимів та параметрів акустичної хвильової установки.

Важливим реологічним параметром, що впливає на стадії процесів кавітації, є в'язкість. Якщо при коефіцієнті в'язкості рідини, близькому до в'язкості води ( $\mu = 10^{-3}$  Па·с), вплив в'язкості на сплескування кавітаційних бульбашок є незначним,

то при коефіцієнті в'язкості  $\mu = 10^{-2} - 10^{-1}$  Па·с дія в'язких сил вже починає позначатися на поведінці кавітаційних бульбашок. Вплив в'язкості суттєво проявляється при малих амплітудах акустичного тиску і, передусім, на бульбашки з невеликими радіусами. В'язкість призводить до того, що бульбашки малого радіусу не сплескуються. Граничні значення інтенсивності для середовища різної в'язкості приведені в табл. 2.

**Таблиця 2. Граничні значення інтенсивності для середовища різної в'язкості**

В'язкість, $\eta, 10^{-3}$ Па	20	40	80	100	150	250	300	400
Інтенсивність, $I_{\min}, \text{Вт/см}^2$	1,75	2,00	2,45	2,55	3,75	7,50	12,50	16,00
Інтенсивність, $I_{\max}, \text{Вт/см}^2$	4,35	6,00	7,55	7,75	10,35	17,00	21,55	35,00

Для утворення максимальної області (кластеру) бульбашок, що сплескуються, були визначені числові значення зміни акустичних параметрів відповідно до властивостей середовища (табл. 3 та 4).

**Таблиця 3. Акустичні параметри**

Амплітуда коливань, мкм	4,0	12,0	20,0
В'язкість, $10^{-3}$ Па·с	1,0	30,0	50,0
Максимальний радіус бульбашки, мкм	35,0	48,0	60,0
Поверхневий натяг бульбашки, $10^{-3}$ Н/м	1	72	150

**Таблиця 4. Залежність максимального радіуса кавітаційних бульбашок від величини звукового тиску**

Величина звукового тиску, 103 Па	500	1000	1500	2000	2500	3000
Відношення радіусів бульбашки, $R_{\max}/R_0$	160	270	350	420	460	520

За результатами досліджень, виявлено закономірності зміни амплітуд, швидкостей, прискорень коливань, акустичних тисків (рис. 10) та їх градієнтів при зміні інтенсивності та частоти коливань (рис. 16).

Підтверджено гіпотезу значної зміни параметрів за їх числовими значеннями в умовах врахування стадійного кавітаційного процесу обробки різних за своїми властивостями середовищ. Окрім цих параметрів важливим елементом розробки нових та вдосконалення наявних кавітаційних апаратів є режим обробки технологічного середовища. Результати виконаних досліджень засвідчують необхідність розробки системи управління процесом кавітаційної обробки за багатофункціональними змінами параметрів з певною, наперед заданою, програмою контролю та адаптацією до конкретного складу технологічного середовища.



Очевидним та найбільш ефективним режимом ультразвукової кавітаційної обробки технологічного середовища для будь-якого процесу з енергетичного погляду є резонансний. Складність визначення такого режиму полягає в отриманні достовірної інформації щодо визначення наявної кавітаційної області бульбашок, у якій вони одночасно сплескуються. Віддаючи належне резонансному режиму, розглянуто в послідовному викладенні методики з визначення резонансної частоти бульбашки, а потім і всієї області у вигляді певного кластеру, який відтворює процедуру взаємодії бульбашок між собою та з акустичними хвилями стискування і розрідження в тому чи іншому вигляді.

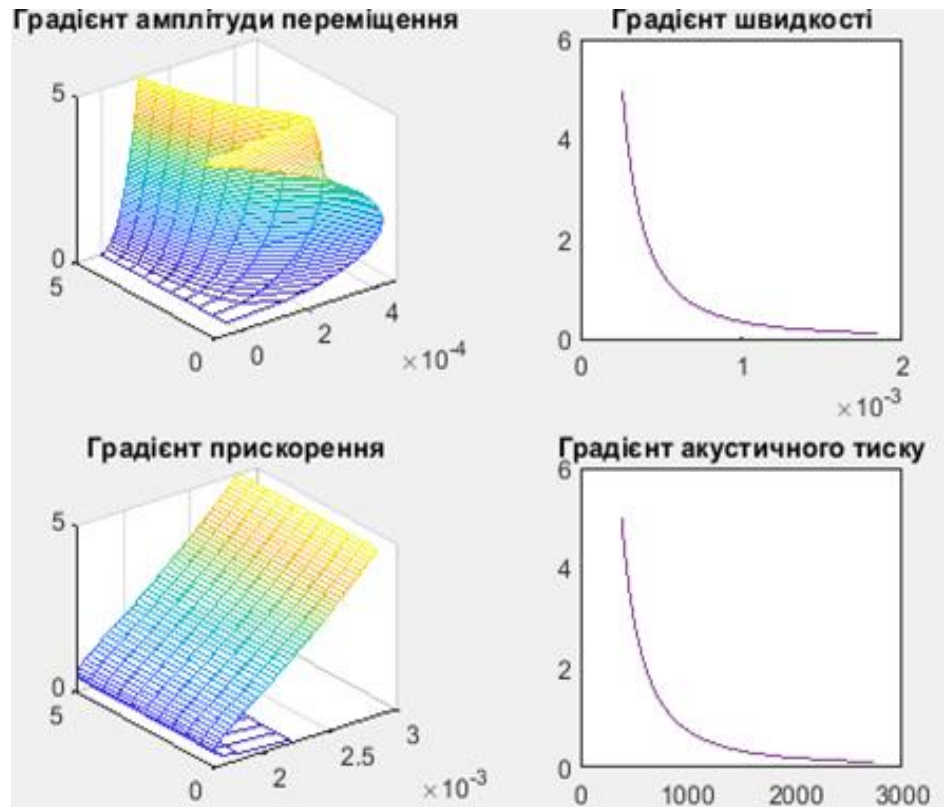
Отримані в роботі залежності засвідчують, що неврахування розсіювання енергії в рівняннях руху бульбашки призводить до неможливості точно відобразити резонансний режим. Тому врахування розсіювання енергії у формулі для власної частоти коливань  $\omega_{вл}$  є необхідною умовою для гарантованого забезпечення резонансного режиму. З цією метою запропоновано формулу, у якій враховані пружні ( $c_{np}$ ) та дисипативні ( $\delta_{np}$ ) властивості бульбашки :

$$\omega_{вл} = \sqrt{\left[ \frac{3\gamma}{\rho R_0^2} \left( P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) - \frac{2\sigma}{\rho R_0^3} + \frac{2c_{np}}{\rho R_0^3} \right] - \left( \frac{2\pi\delta_{np}}{\omega} \right)^2} \quad (62)$$

Для систем із розподіленими параметрами власна частота коливань розраховується для першої гармоніки за формулою:

$$\omega_{вл} = \frac{\pi c}{2l} = \frac{\pi}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (63)$$

Цю формулу отримано за певних передумов, що бульбашка є вільною від взаємодії з іншими бульбашками, відсутній вплив ультразвукового перетворювача,



**Рисунок 16 – Графіки зміни градієнтів основних параметрів кавітаційного процесу**



окрім сили  $F_l$ . Її реальне застосування потребує уточнення параметрів: модуля пружності та густини бульбашки – їхнього стану, залежності та числових значень на конкретному етапі стадій проходження процесу кавітації і геометричної характеристики, якою є довжина  $l$ , у напрямку якої розповсюджується хвиля. Тому для врахування зміни властивостей середовища від однорідного на початковій стадії до появи кавітаційних бульбашок варто розглядати як нове середовище із змінними у часі параметрами. Тоді застосування формули (62) потребує корекції, яку трансформовано до вигляду:

$$\omega_{en} = \frac{\pi}{2l} (2n-1) \sqrt{\frac{(E' + iE'')(t_c)}{\rho(t_c)}}, \quad (64)$$

де  $t_c$  – час, який визначає період проходження стадії обробки технологічного середовища;  $i$  – уявна одиниця;  $E'$ ,  $E''$  – дійсна й уявна частини комплексного модуля пружності, які визначаються за формулами, приведеними в роботі. Подібним чином визначені в роботі вирази для встановлення резонансних частот і для інших конструктивних рішень щодо розташувань кавітатора. Згідно із розрахунками за формулами для визначення резонансного режиму, отримано коефіцієнт підсилення амплітуди коливань в 7–8 разів, що надає не тільки зменшення енергії на 50–70 %, а й може гарантувати стійкий режим роботи акустичної установки. Коефіцієнт поглинання характеризує зміну питомої енергії та інтенсивності ультразвуку в опромінюваному середовищі і слугує критерієм оцінювання ефективності проходження технологічного процесу обробки рідинного середовища. Встановленням компенсатора отримано умову максимальної передачі енергії та збільшення об'єму зони розвиненої кавітації на 35–45 %.

Наведені практичні результати розроблених методів та способів інтенсифікації різних технологічних процесів ультразвукової обробки технологічних середовищ.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота містить нове розв'язання актуальної наукової проблеми, яка полягає у розробці технології й обладнання ультразвукової обробки рідинних дисперсних середовищ на основі синтезу досліджених умов взаємодії акустичного апарата і середовища та цілеспрямованої реалізації запропонованих режимів і параметрів робочого процесу. Результати, отримані у процесі дослідження, дають підстави сформулювати такі висновки та пропозиції.

1. Здійсненим аналізом сучасних методів та обладнання ультразвукової кавітаційної обробки технологічних середовищ і матеріалів визначено, що сучасний стан теорії не розкриває повної картини процесу кавітаційної обробки, унаслідок чого стримується його розвиток, залишається невирішеною проблема вдосконалення режимів і параметрів.

2. Визначення методик досліджень обґрунтовано на основі прийняття технологічного середовища як дисперсного, а в аналітичних моделях, як систем з розподіленими параметрами, враховуються: режим навантаження та умови впливу на випромінювач, фізичні характеристики і реологічні властивості.

3. Розроблений алгоритм досліджень передбачає поетапне визначення і врахування у часі послідовності стадій утворення, розвитку та сплескування бульбашок кавітаційної області, що надало змогу наблизити реальну картину процесу до змодельованої розрахункової схеми досліджень.

4. Встановлено закономірності руху системи «кавітаційний апарат – середовище», їх взаємодію на основі врахування дискретних та розподілених параметрів. Зведення до дискретної форми математичних залежностей уможливило отримання формули для цілеспрямованого узгодження режимів і параметрів кавітаційного апарата і технологічного середовища. Встановлення компенсатора між випромінювальною поверхнею апарату і оброблювальним середовищем забезпечено максимальну передачу енергії та збільшення об'єму зони розвиненої кавітації на 35–45 %.

5. Визначено критерії та параметри, використання яких пропонується як оцінювання в алгоритмах та методиках розрахунків раціональних режимів і параметрів залежно від вихідних даних кавітатора та середовища.

6. Встановлено нові числові значення інтенсивності в межах  $5,0 \dots 20,0 \text{ Вт/см}^2$  для утворення раціонального об'єму кавітаційної зони. Визначені основні умови виникнення першого та другого порогів кавітації від зміни швидкості коливань,  $v$ . Для  $v=0,1 \text{ м/с}$  – перший, а при  $v>5,0 \text{ м/с}$  настає другий поріг.

7. Запропоновано як основний параметр класифікації прийняти в'язкість, тому що ефективність обробки рідинних технологічних середовищ зумовлена відповідними рівнями граничних значень інтенсивності. Якщо при коефіцієнті в'язкості рідини, близькому до в'язкості води ( $\mu=10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ), вплив в'язкості на сплескування кавітаційних бульбашок є незначним, то при коефіцієнті в'язкості  $10^{-2} \dots 10^{-1} \text{ Па}\cdot\text{с}$  дія в'язких сил вже починає позначатися на поведінці кавітаційних бульбашок. Вплив в'язкості найбільш сильно проявляється при малих амплітудах акустичного тиску і, першою чергою, позначається на бульбашках з невеликими радіусами.

8. Для утворення області (кластеру) бульбашок, що сплескуються, синтезовано в єдину систему параметри: амплітуда коливань – у межах  $4,0 \dots 20,0 \text{ мкм}$ , величина звукового тиску – у межах  $5,0 \dots 30,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$ , відповідне значення в'язкості – у межах  $1,0 \dots 50,0 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$  та максимальний радіус бульбашки – у межах  $35,0 \dots 60,0 \text{ мкм}$ .

9. Здійснено дослідження енергії обробки технологічного середовища за умови гармонійної та імпульсної дії акустичного апарата. Отримано аналітичні залежності енергетичних критеріїв для оцінки процесів кавітаційної обробки технологічних середовищ.

10. Досліджено та послідовно викладено методики визначення резонансної частоти бульбашки, а потім і всієї області у вигляді певного кластеру. Згідно з розрахунками за формулами для визначення резонансного режиму отримано коефіцієнт підсилення амплітуди коливань у 7–8 разів, що не лише сприяє зменшенню енергії на 50–70 %, а й гарантує стійкий режим роботи акустичного апарату.

11. Проведені дослідження підтвердили достатню достовірність прийнятих фізичних і математичних моделей. Щодо розбіжностей між значеннями таких параметрів коливань, як звуковий тиск, амплітуди коливань, інтенсивність,

отриманих різними методами, становить 12–15 %. Менша розбіжність відноситься до звукового тиску та середовищ з меншою в'язкістю, тому що параметри в резонансному режимі суттєво залежать від точності врахування дисипативних властивостей, які визначаються в'язкістю.

12. Здійснено практичну реалізацію ефективності результатів досліджень на прикладі виявлених нових фізичних явищ робочих процесів акустичної обробки рідинних середовищ, розроблених теоретичних основ теорії руху складних динамічних систем, алгоритмів методів та способів. Наведено дані про впровадження отриманих результатів досліджень у навчальний процес та на підприємствах.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Монографії:

1. Скоромна О. І., Разанова О. П., Поліщук Т. В., Шевчук Т. В., **Берник І. М.**, Паладійчук О. Р. Науково обґрунтовані заходи підвищення молочної продуктивності корів та покращання якості сировини в умовах виробництва. Монографія. Вінниця: ВНАУ, 2020. 174 с. *Здобувачем розроблено технологію знезараження за використання ультразвукової кавітації.*

### Статті у наукових фахових виданнях:

2. Луговський О. Ф., **Берник І. М.** Ультразвукові кавітаційні апарати для реалізації екологічно безпечної технології вилучення пектину із вторинної рослинної сировини. Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія машинобудування. 2010, № 58. С. 82–86. (РІНЦ, Index Copernicus, Google Scholar). *Здобувачем здійснено аналіз кавітаційного обладнання для рідинно-дисперсних середовищ.*

3. Луговський О. Ф., **Берник І. М.** Фізична модель ультразвукового кавітаційного вилучення пектину із вторинної рослинної сировини. Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2010, №1 (5) С. 25–30. (РІНЦ, Index Copernicus, Google Scholar). *Здобувачем розроблено фізичну модель ультразвукового кавітаційного вилучення пектину.*

4. Луговський О. Ф., **Берник І. М.** Ультразвуковий кавітаційний екстрактор для рідинно-дисперсних середовищ. Наукові праці ОНАХТ. Серія «Технічні науки». 2010, №37. С. 348–352. *Здобувачем запропоновано фізичну модель для рідинно-дисперсних середовищ.*

5. **Берник І. М.**, Луговський О. Ф., Мовчанюк А. В. Дослідження звукового поля та технологічних можливостей малоамплітудного резонансного кавітатора при обробці рідинно-дисперсних середовищ. Промислова гідравліка і пневмоавтоматика. 2011, № 1 (31). С. 44–47. *Здобувачем досліджено модель кавітаційних технологій у технологічних процесах.*

6. **Берник І. М.**, Луговський О. Ф., Лобань Ю. М. Модель управління технологічним процесом ультразвукового кавітаційного вилучення пектину з рослинної сировини. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2011, №1 (61). С. 133–137. *Здобувачем запропоновано модель управління процесом ультразвукового кавітаційного вилучення пектину.*

7. **Берник І.М.**, Луговський О.Ф., Мовчанюк А.В. Ультразвукова кавітаційна технологія для екстрагування рослинного матеріалу та обладнання для її реалізації. Вібрації в техніці та технологіях. 2011, №3 (63). С. 86–91. *Здобувачем досліджено модель кавітаційних технологій у технологічних процесах екстрагування рослинного матеріалу.*
8. Луговський О. Ф., **Берник І. М.** Виробництво пектинового концентрату з використанням ультразвукових кавітаційних технологій. Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія «Технічні науки». 2011, Вип. 9. С. 159–163. *Здобувачем визначено процес виробництва пектинового концентрату.*
9. Луговський О. Ф., **Берник І. М.** Теоретичне обґрунтування доцільності використання ультразвукових кавітаційних технологій у технологічних процесах. *Техніка будівництва*. 2011, №26. С. 52–59. *Здобувачем обґрунтовано доцільність використання ультразвукових кавітаційних технологій.*
10. Берник І. М. Основні засади проектування машин і обладнання переробних виробництв. Теорія і практика будівництва. 2011, №8. С. 6–9.
11. Луговская Е. А., Яхно О. М., **Берник И. Н.** Модель управления технологическим процессом ультразвуковой очистки эластических поверхностей. Наукові праці ДонНТУ. Серія: Гірничо-електромеханічна. 2012, Вип. 23 (196). С. 154–166. *Здобувачем визначено модель управління технологічним процесом.*
12. Берник І. М. Інтенсифікація технологічних процесів обробки харчових середовищ. Вібрації в техніці та технологіях. 2013, №3 (71). С. 109–115.
13. Берник І. М. Аналіз параметрів впливу на формування моделі акустичної обробки рідинних харчових середовищ. Наукові праці ОНАХТ. Серія «Технічні науки». 2014, Вип. 45 (2). С. 129–133.
14. Луговський О. Ф., **Берник І. М.** Встановлення основних параметрів впливу технологічного середовища на робочий процес ультразвукової кавітаційної обробки. Вібрації в техніці та технологіях. 2014, №3 (75). С. 121–126. *Здобувачем розраховано параметри впливу технологічного середовища на робочий процес.*
15. Берник І. М. Дослідження параметрів кавітаційного процесу обробки технологічних середовищ. Техніка будівництва. 2014, №32. С. 14 – 18.
16. Берник І. М. Енергетика кавітаційної обробки технологічного середовища. Наукові праці ОНАХТ. 2015, Том 1 (47). С. 87–90.
17. **Bernyk I.**, Luhovskyi O., Nazarenko I. Research staff process of interaction and technological environment in developed cavitation. Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. 2016, Вип. №1 (76). С. 12–19 (РІНЦ, Index Copernicus, Google Scholar). *Здобувачем досліджено технологічні параметри.*
18. Bernyk I. Research parameters of ultrasound processing equipment dispersed in a technological environment. Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. 2016, Vol. 18. №3. p. 3–13 (Закордонне видання, Польща, Index Copernicus).
19. Луговський О. Ф., **Берник І. М.** Аналіз методів визначення швидкості розповсюдження хвиль в кавітаційній області ультразвукового поля. Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2016, № 18 С. 10–15. (World Cat,

Google Scholar, Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory). *Здобувачем виконано аналіз методів визначення швидкості розповсюдження хвиль в кавітаційній області.*

20. Bernyk I. Theoretical aspects of the formation and development of cavitation processes in technological environment. Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. 2017, Vol.19. № 3. P. 5–13. (Закордонне видання, Польща, Index Copernicus).

21. Берник І.М. Інтенсифікація процесу екстрагування рослинної сировини з використанням ультразвукової кавітації. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2017, № 3(98). 69–73.

22. **Bernyk I.**, Luhovskyi O. Research and calculation of rational modes and parameters of an ultrasonic cavitator. IX International Conference “Heavy Machinery-НМ 2017”. Zlatibor, 28 Jule. 1 July 2017, P. 109 – 112. (Закордонне видання, Сербія). *Здобувачем приведено алгоритм розрахунку параметрів кавітатора.*

23. Берник І.М. Дослідження в'язкості дисперсних середовищ в умовах їхньої інтенсивної обробки. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2018, №1 (100). С. 62–67.

24. Bernyk I. Investigation of the processes of the acoustic apparatus with the processing technological environment power interaction. Mechanics and Advanced Technologies. 2018, Том 1. № 82. С. 72–80. (ПІНЦ, Index Copernicus, Google Scholar).

25. Luhovskyi O. F., Gryshko I. A., **Bernyk I. M.** Enhancing the Efficiency of Ultrasonic Wastewater Disinfection Technology. Journal of Water Chemistry and Technology. 2018, Vol. 40. Is.2. P. 95–101 (Web of Science). *Здобувачем здійснена оцінка властивостей стічної води.*

26. **Bernyk I.**, Nazarenko I., Luhovskyi O. Effect of rheological properties of materials on their treatment with ultrasonic cavitation. Materials and technology. 2018, № 4 (52). P. 465–468. (Закордонне видання, SCOPUS, Словенія). *Здобувачем розроблено алгоритм визначення параметрів кавітаційного процесу.*

27. **Bernyk I.**, Nazarenko I., Luhovskyi O., Svidersky A. Researcher of the influence of low-frequency and high-frequency actions on processing of technological environments. Eureka: Physics and Engineering. 2018, №1. P. 73–86. (Закордонне видання, РИНЦ, SIS, I2OR, DRJI, Open Academic, Index Copernicus, Google Scholar, WorldCat). *Здобувачем здійснені аналітичні дослідження континуальної моделі обробки технологічного середовища.*

28. **Берник І. М.**, Кутняк М. М., Коц І. В. Віброекстрактори з гідроімпульсним приводом для застосування в робочих процесах систем «тверде тіло – рідина». Продовольчі ресурси: зб. наук. пр. 2019, №12 С. 16–24. *Здобувачем розраховано параметри віброекстрактора.*

29. **Берник І. М.**, Коц І. В. Вибір алгоритму управління процесом барометричної обробки харчової сировини в тепловій камері з аеродинамічним нагріванням. Продовольчі ресурси. 2019, №13. С. 7–14. *Здобувачем розроблено алгоритм управління процесом барометричної обробки харчової сировини.*

30. Bernyk I. Research and Determination of Effective Parameters for Acoustic Technological Environment. Тека. 2019, Vol.19. №1. P. 65 – 77 (Закордонне видання, Польща, Index Copernicus).

31. **Bernyk I.**, Luhovskyi O., Wojcik W., Shedreyeva I., Karnakova G. Theoretical Investigations of the Interaction of Acoustic Apparatus with Technological Environment

Working Process. Przegląd Elektrotechniczny. 2019, №1(4). P. 32–37. (Закордонне видання, Scopus та Web of Science, Польща). *Здобувачем описано процес ультразвукової кавітаційної обробки рідинного середовища.*

32. Берник І. М. Інноваційний підхід до одержання високоякісного молока-сировини. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2019, №3(106). С. 46–55.

33. Bernyk I. Estimation of efficiency of ultrasonic cavitation processing of technological media on energy criteria. Mechanics and Advanced Technologies. 2020, №2 (89). С. 18–28. (ПІНЦ, Index Copernicus, Google Scholar).

34. **Берник І. М.**, Коц І. В., Бауман К. В. Гідродинамічна установка для приготування жирових емульсій. Продовольчі ресурси. Збірник наукових праць. 2020, № 14. С. 29–34. *Здобувачем здійснено вибір обладнання для ультразвукової кавітаційної інактивації мікроорганізмів у рідкому середовищі.*

35. Luhovskyi O., **Bernyk I.**, Gryshko I., Abdulina D., Zilinskyi A. Mobile Equipment for Ultrasonic Cavitation Inactivation of Microorganisms in the Liquid Environment. In: Stryczek J., Warzyńska U. (eds) Advances in Hydraulic and Pneumatic Drives and Control 2020, P. 272-281. NSHP 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-59509-8\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-030-59509-8_24) (Закордонне видання, Scopus, Web of Science, Польща). *Здобувачем проведено розрахунок акустичної системи ультразвукового апарата для інактивації мікроорганізмів у рідкому середовищі.*

36. Nazarenko I., Dedov O., **Bernyk I.**, Rogovskii I., Bondarenko A., Zapryvoda A., Titova L. Determination of stability of models and parameters of motion of vibrating machines for technological purpose. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020, Vol. 6. №7 (108). P. 71–79 (Scopus). *Здобувачем розроблено аналітичну модель для дослідження руху дискретно-континуальної системи.*

37. Луговський О. Ф., Зілінський А. І., Шульга А. В., Лавріненков А. Д., Гришко І. А., **Берник І. М.** Експериментальне дослідження стійкості конструкційних матеріалів до кавітаційної ерозії. Mechanics and Advanced Technologies. 2020, №3 (90). С. 29–33 (ПІНЦ, Index Copernicus, Google Scholar). *Здобувачем здійснено аналіз експериментальних досліджень.*

#### **Патенти на корисну модель:**

38. Патент на корисну модель № 201809320. Спосіб підготовки води в басейнах для плавання із застосуванням ультразвуку. Луговський О. Ф., **Берник І.М.**, Гришко І. А., Зілінський А. І., Луговська К. О., Храменков О. В. заявл. 12.09.2018; опубл. 11.02.2019, Бюл. № 3. *Участь у створенні винаходу всіх співавторів однакова.*

39. Патент на корисну модель №137288. Спосіб ультразвукової кавітаційної інактивації мікрофлори рідинних технологічних середовищ. Берник І.М. заявл. 72.04.2019; опубл. 10.10.2019, Бюл. № 19.

40. Патент на корисну модель № 144597. Мобільний ультразвуковий пристрій для обробки рідини. Луговський О. Ф., **Берник І.М.**, Мовчанюк А.В., Гришко І. А., Луговська К.О., Зілінський А.І., Шульга А.В. заявл. 18.05.2020; опубл. 12.10.2020, Бюл. № 19. *Участь у створенні винаходу всіх співавторів однакова.*

### Тези доповідей у збірниках матеріалів конференцій:

41. Луговський О. Ф., Берник І. М. Перспективи використання енергоощадних методів обробки харчових середовищ. Матеріали XVII Міжнародної науково-технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». Черкаси, 17–20 квітня 2012. С. 49. *Здобувачем наведено критерії оцінки використання енергоощадних методів обробки середовищ.*

42. Луговський О. Ф., Берник І. М. Підвищення якості молочної продукції за рахунок застосування явища ультразвукової кавітації. Тези доповідей XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка та технологія». Севастополь, 11–15 червня 2012. С. 44. *Здобувачем обґрунтовано застосування явища ультразвукової кавітації в середовищах.*

43. Берник І. М., Луговський О. Ф. Моделювання характеристик харчового середовища в акустичному полі навантаження. Матеріали XIX Міжнародної науково-технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». Кіровоград, 21–24 травня 2014 р. С. 59–60. *Здобувачем проведено моделювання технологічних середовищ.*

44. Луговской А. Ф., Мовчанюк А. В., Берник И. Н., Гришко И. А. Ультразвуковые кавитационные стерилизаторы жидких сред. Матеріали першої науково-практичної конференції біомедичних інженерів і технологів України «Сучасний стан та перспективи біомедичної інженерії і медичної промисловості України». Київ, 7–8 жовтня 2015 р. С. 31. *Здобувачем визначено ефективні кавітаційні апарати для обробки рідинних середовищ.*

45. Берник І. М., Луговський О. Ф. Енергетика кавітаційної області. Матеріали XX Міжнародної науково-технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». Київ НТУУ «КПІ». 25–29 травня 2015 р. С. 50. *Здобувачем проведено дослідження енергетичних критеріїв.*

46. Луговський О. Ф., Мовчанюк А. В., Берник І. М. Ультразвукова кавітація в сучасних технологіях. Матеріали МНТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 21–24 червня 2016 р. м. Одеса – м. Київ. С. 132. *Здобувачем наведені дані ефективного використання ультразвукової кавітації в сучасних технологіях.*

47. Луговской А. Ф., Мовчанюк А. В., Берник И. Н., Гришко И. А. Повышение эффективности технологических процессов с помощью ультразвуковой кавитации. Тези доповідей XVII Міжнародної науково-технічної конференції «Промислова гідраліка і пневматика». Харків, 19–21 жовтня 2016. С. 33–34. *Здобувачем обґрунтовано параметри підвищення ефективності застосування ультразвукової кавітації.*

48. Берник І. М., Луговський О. Ф. Фізичні аспекти послідовності досліджень кавітаційного процесу. Матеріали XXII Міжнародної науково-технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». Черкаси. 23–26 травня 2017 р. С. 32 – 33. *Здобувачем наведено стадії кавітаційного процесу.*

49. Берник І. М., Луговський О. Ф. Синергетика стадій кавітаційного процесу обробки технологічних середовищ. Тези доповідей XVIII Міжнародної науково-технічної конференції «Промислова гідраліка і пневматика». Вінниця:

ВНТУ, 2017. С. 23–24. *Здобувачем подано структурні схеми та алгоритм синергетики стадій кавітаційного процесу.*

50. **Берник І. М.**, Луговський О. Ф. Ексергія ультразвукової обробки технологічних середовищ. Тези доповідей Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність в галузях економіки України». Вінниця: ВНТУ, 2017. С. 131. *Здобувачем розраховано критерії оцінки параметрів ультразвукової обробки технологічних середовищ.*

51. Берник І. М. Дослідження робочого процесу взаємодії акустичного апарату із технологічним середовищем. «Вібрації в техніці та технологіях» XVI Міжнародна науково-технічна конференція 26–27 жовтня 2017 р.: збірник тез доповідей. Вінниця: ВНТУ, 2017. С. 47–48.

52. Луговський О. Ф., **Берник І. М.** Аспекти ультразвукових технологій в харчовій промисловості. Тези доповідей V Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційний розвиток харчової індустрії». Київ: ІПР, 2017. С. 135–136. *Здобувачем дана оцінка ультразвуковим технологіям.*

53. Берник І. М. Теоретичні аспекти моделювання та визначення режимів і параметрів акустичної обробки технологічних середовищ. Матеріали XXIII Міжнародної науково-технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». Київ НТУУ «КПІ». 19–22 червня 2018 р. С. 96–98.

54. Берник І. М. Встановлення раціонального рівня енергії та оптимальних параметрів ультразвукової кавітаційної обробки технологічних середовищ. Збірник тез доповідей XVII Міжнародної науково-технічної конференції «Вібрації в техніці та технологіях» НУ «Львівська політехніка». Львів, 2018 р. С. 47–48.

55. Берник І. М. Врахування зміни властивостей технологічного середовища в процесі ультразвукової обробки на встановлення ефективних параметрів. Збірник тез доповідей I-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту». Вінниця ВНТУ, 13-15 травня 2019 року. С. 231–232.

56. Берник І. М. Дослідження коефіцієнта згасання ультразвуку в кавітуючому рідинному середовищі. Матеріали XXIV Міжнародної науково-технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». Київ НТУУ «КПІ», 27–30 травня 2019 р. С. 89–90.

57. Берник І. М. Визначення та дослідження енергії ультразвукових коливань за гармонійним та імпульсним законами навантаження на технологічне середовище Матеріали XVIII Міжнародної науково-технічної конференції Вібрації в техніці та технологіях, 23-25 жовтня 2019 р. Київ КНУБА, 2019. С. 129–132.

58. Берник І. М. Критерії оцінки кавітаційної обробки технологічних середовищ. XXV Міжнародна науково-технічна конференція «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». Київ, 6–9 жовтня 2020 р.: Матеріали конференції. Київ, 2020. С. 326–328.



## АНОТАЦІЯ

**Берник І. М. Наукові основи вдосконалення технології і обладнання ультразвукової обробки дисперсних середовищ.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2021.

Дисертацію присвячено вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми, яка полягає у розробці науково обґрунтованих методів удосконалення технології і обладнання ультразвукової обробки дисперсних середовищ на основі синтезу досліджених умов взаємодії середовища й акустичного апарату та цілеспрямованого узгодження режимів і параметрів робочого процесу. Визначено методологію та розроблено методику досліджень параметрів взаємодії акустичного апарату та технологічних середовищ. Здійснено дослідження енергії та складових реологічних характеристик різних технологічних середовищ в умовах акустичної кавітації. Представлено результати аналітичного дослідження: як зміни контактного тиску, так і всього процесу акустичної обробки технологічного середовища. Розроблено алгоритми та методики розрахунку раціональних режимів та параметрів ефективного проходження акустичної обробки технологічних процесів. Результати досліджень впроваджені у навчальний процес та виробництво. Розроблено рекомендації вдосконалених режимів та параметрів акустичної обробки технологічних процесів.

*Ключові слова:* ультразвукова обробка, кавітація, дисперсні середовища, бульбашка, сплескування, взаємодія, реологічні та фізичні властивості, модель, критерії, режими, дискретні, континуальні, параметри.

## ANNOTATION

**Bernyk I. M. Scientific basis for improving the technology and equipment for ultrasonic treatment of dispersed environments.** – Qualification scientific work on the rights of a manuscript.

Thesis for obtaining a scientific degree of Doctor of Technical Sciences, speciality 05.17.08 – processes and the equipment of chemical technology. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

Thesis is devoted to the solution of the actual scientific and applied issue consisting in the development of scientifically substantiated methods of improvement of dispersed environment ultrasonic processing technology and equipment on the basis of synthesis of researched conditions of environment and acoustic device.

The rheological characteristics components of different technological environments in the conditions of acoustic cavitation are investigated. Determination of changes of the technological environment rheological properties i.e. viscosity, ductility and elasticity based on the contact pressure dependence on these parameters. Experimental researches of ultrasonic oscillations intensity and the amplitude of sound pressure at the respective measurement points of the technological environment have been carried out. According to

the results of experiments, the attenuation oscillations coefficients of technological environments were determined.

Dependences for modes and parameters of the cavitation device and technological environment coordination are received. Representation of the environment as a system with distributed parameters based on the wave theory of its motion and the installation of a compensator will ensure maximum energy transfer and increase the volume of the developed cavitation zone by 35–45%. Properties studies allowed to describe the process more accurately and to determine the conditions of interaction between the environment and the cavitation apparatus in order to improve the energy source parameters and characteristics.

The general approach to determining the technological environment energy processing is substantiated. Analytical dependences for energy determination on harmonic power loading which consider processes of interaction of the acoustic device with technological environment are resulted. Analytical dependences of energy criteria for estimation of technological environments cavitation processing are received.

The interaction of the cavitation apparatus and the technological environment is revealed, the power and energy components of their interaction are determined. The laws of interaction of the technological environment and the cavitation apparatus are established. The internal properties of the apparatus – environment joint system were coordinated. The pressure of the acoustic device in the contact area with the environment (sound pressure); hydrostatic pressure; fluid pressure; surface tension forces; viscous friction forces; internal pressure in the cavitation bubble; gas pressure; saturated vapor pressure in the liquid were determined.

The motion equation of acoustic apparatus – technological environment system on the basis of discrete-continuous model is made. Analytical dependences for determination of contact pressure, amplitudes of oscillations and energy on the course of technological process for harmonic and pulse load modes are obtained. The wave coefficients change is investigated.

Studies have confirmed that sound pressure is the key parameter in the gas and air bubbles evolution in the acoustic field formed in the contact zone of the acoustic apparatus – environment system. It has been proved for the first time that it is necessary to take into account both the reactive pressure component and the active one characterizing the dissipative properties of the environment choosing a model of the treatment environment. The dependences for the acoustic apparatus vibration resonance calculation are obtained providing an energy consumption reduction by 50 - 70% and a stable mode of dispersed environment processing.

Algorithms and recommendations for determining the modes and parameters of processing of technological environments which are different in physical and mechanical properties and their areas of application have been developed.

*Key words:* ultrasonic processing, cavitation, dispersed environment, bubble, flattening, interaction, rheological and physical properties, model, criteria, modes, discrete, continuous, parameters.